

电子工业技术词典

电子陶瓷与压电、铁电晶体

国防工业出版社

H

N1-61

/9

电子工业技术词典

电子陶瓷与压电、铁电晶体

《电子工业技术词典》编辑委员会 编



国防工业出版社

内 容 简 介

《电子工业技术词典》是在一九六四年出版的《无线电工业技术词典》(试用本)的基础上作了较大修改和增补而编写的。

本《词典》是一本为广大工农兵和干部提供的深入浅出、简明实用的工具书。它也可供从事某个具体专业的科技人员在了解电子工业整个领域的全貌、扩大知识面时参考。

本《词典》共有三十四章。正文中各词汇后附有英文对照,书末附有英文索引,合订本中还附有汉字笔画索引。在出版合订本之前,将先分册出版。各分册所包括的章节内容和出版先后次序,将视具体情况而定。

本分册是《词典》第九章电子陶瓷与压电、铁电晶体,内容包括:物理基础,电子陶瓷,压电、铁电晶体,工艺及应用等五节。

电子工业技术词典

电子陶瓷与压电、铁电晶体

《电子工业技术词典》编辑委员会 编

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业营业登记证出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

787×1092¹/₁₆ 印张5¹/₄ 105千字

1977年6月第一版 1977年6月第一次印刷 印数:00,001—17,500册

统一书号:17034·29-32 定价:0.59元

前 言

《电子工业技术词典》是在无产阶级文化大革命伟大胜利的鼓舞下，在学习无产阶级专政理论的热潮中，在电子工业发展的新形势下出版的。它是在一九六四年出版的《无线电工业技术词典》（试用本）的基础上编写的。

原《词典》自发行以来，曾受到广大读者的欢迎，为宣传、普及、推广电子技术知识起了一定的作用。十多年来，在毛主席革命路线的指引下，我国电子工业已有很大的发展，生产规模不断扩大，技术水平迅速提高，技术队伍日益壮大，电子技术的推广应用已引起国民经济各部门的重视，并在社会主义革命和社会主义建设中发挥出作用。目前，电子工业已成为国民经济的一个组成部分，电子工业战线的广大职工正在为实现第四届全国人民代表大会提出的宏伟目标而努力奋斗。为适应这一大好形势，更好地为无产阶级政治服务，为工农兵服务，为社会主义服务，我们对原《词典》进行了一次较大的修改和增补。内容力求反映七十年代电子技术的水平，释文尽量做到简明、通俗。目的是为了向要求对电子工业技术有一般常识的广大工农兵和干部提供一本实用的工具书；同时也可供从事某个具体专业的科技人员在了解电子工业整个领域的全貌和扩大知识面时参考。

本《词典》共分三十四章。其目录如下：

- | | |
|-----------------|-------------|
| 一、电工基础； | 二、基本电子线路； |
| 三、网络分析与综合； | 四、电波传播与天线； |
| 五、信息论； | 六、电阻、电容与电感； |
| 七、厚薄膜电路； | 八、磁性材料与器件； |
| 九、电子陶瓷与压电、铁电晶体； | 十、机电组件； |
| 十一、电线与电缆； | 十二、电子管； |
| 十三、半导体； | 十四、电源； |
| 十五、其它元器件； | 十六、通信； |

十七、广播与电视；

十九、导航；

二十一、电子对抗；

二十三、系统工程；

二十五、微波技术；

二十七、红外技术；

二十九、电声；

三十一、声纳；

三十三、电子测量技术与设备；

十八、雷达；

二十、自动控制与遥控、遥测；

二十二、电子计算机；

二十四、电子技术的其它应用；

二十六、显示技术；

二十八、激光技术；

三十、超声；

三十二、专用工艺设备与净化技术；

三十四、可靠性。

各章互有联系，并尽量避免章节间词汇的重复，故每章只有一定的系统性。正文前有章节和词汇目录，正文中各词汇后附有英文对照，最后附有汉字笔画索引与英文索引。本《词典》将先分册出版，各分册所包含的章节内容和出版先后次序将视具体情况而定。各分册无汉字笔画索引。

本《词典》的编写工作，自始至终是在毛主席革命路线的指引下，在党的领导下进行的。贯彻了“独立自主，自力更生”的伟大方针，坚持了群众路线，实行了工人、干部、科技人员和生产、科研、教学两个三结合，以及理论联系实际的原则。《电子工业技术词典》本身就是广大群众集体智慧的结晶。它的编写过程也反映了无产阶级文化大革命后我国出版战线上的新气象。

由于我们水平有限，加上时间仓促，虽然作了很大努力，但《词典》中还可能存在不少错误和不妥之处，恳请广大读者及时批评指正。

《电子工业技术词典》编辑委员会

一九七五年十月一日

目 录

一、物 理 基 础

晶系.....	9-1	谐振频率.....	9-6
点阵.....	9-1	反谐振频率.....	9-7
点群.....	9-1	基音频率.....	9-7
晶类.....	9-2	泛音频率.....	9-7
空间群.....	9-2	标称频率.....	9-7
三斜晶系.....	9-2	寄生频率.....	9-7
单斜晶系.....	9-2	频率稳定度.....	9-7
斜方晶系.....	9-3	频率老化.....	9-7
三方晶系.....	9-3	频率温度系数.....	9-7
四方晶系.....	9-3	零温度系数点.....	9-7
六方晶系.....	9-3	频率温度特性.....	9-7
立方晶系.....	9-3	频率误差.....	9-8
等轴晶系.....	9-3	传输线路法.....	9-8
原始格子.....	9-3	谐振-反谐振法.....	9-8
底心格子.....	9-4	压电效应.....	9-8
体心格子.....	9-4	正压电效应.....	9-8
面心格子.....	9-4	逆压电效应.....	9-8
钙钛矿型结构.....	9-4	电致伸缩效应.....	9-8
相图.....	9-4	热释电效应.....	9-8
自发极化.....	9-4	铁弹性效应.....	9-9
铁电性.....	9-5	弹性常数.....	9-9
铁电畴.....	9-5	弹性柔顺常数.....	9-9
电滞回线.....	9-5	弹性刚度常数.....	9-9
压电振子.....	9-5	机械品质因数.....	9-9
压电振子等效电路.....	9-5	压电振子的“优值”.....	9-10
最小阻抗频率.....	9-6	泊松比.....	9-10
最大导纳频率.....	9-6	纵横方向变形尺寸比.....	9-10
最大阻抗频率.....	9-6	铁电居里点.....	9-10
最小导纳频率.....	9-6	介质隔离率.....	9-10
串联谐振频率.....	9-6	自由介电常数.....	9-10
并联谐振频率.....	9-6	受夹介电常数.....	9-11

电学品质因数·····	9-11	时间稳定性·····	9-15
介质损耗·····	9-11	温度稳定性·····	9-16
损耗因子·····	9-11	绝缘强度·····	9-16
压电常数·····	9-11	抗弯强度·····	9-16
压电常数 d_{ij} ·····	9-12	导热系数·····	9-16
压电应变常数·····	9-12	线膨胀系数·····	9-16
压电常数 g_{ij} ·····	9-12	振动模式·····	9-17
压电电压常数·····	9-12	径向伸缩振动模·····	9-17
压电常数 e_{ij} ·····	9-12	环电极径向伸缩振动模·····	9-17
压电应力常数·····	9-12	长度伸缩振动模·····	9-18
压电常数 h_{ij} ·····	9-12	纵向长度伸缩振动模·····	9-18
压电劲度常数·····	9-13	横向长度伸缩振动模·····	9-18
机电耦合系数·····	9-13	厚度伸缩振动模·····	9-18
平面机电耦合系数·····	9-13	厚度弯曲振动模·····	9-18
横向机电耦合系数·····	9-13	宽度弯曲振动模·····	9-19
纵向机电耦合系数·····	9-14	鼓形厚度弯曲振子·····	9-19
厚度振动机电耦合系数·····	9-14	开槽环形弯曲振子·····	9-19
厚度切变振动机电耦合系数·····	9-15	厚度切变振动模·····	9-19
频率常数·····	9-15	能阱振动模·····	9-20

二、电 子 陶 瓷

电子陶瓷·····	9-21	氮化硅瓷·····	9-25
装置瓷·····	9-21	四钛酸钡瓷·····	9-25
电真空瓷·····	9-21	锆酸盐瓷·····	9-25
陶瓷原料·····	9-21	多孔陶瓷·····	9-26
高岭土·····	9-22	透明陶瓷·····	9-26
膨润土·····	9-22	蓝宝石·····	9-26
滑石·····	9-22	电容器陶瓷·····	9-26
石英·····	9-22	金红石瓷·····	9-26
滑石瓷·····	9-22	钛酸钙瓷·····	9-27
镁橄榄石瓷·····	9-22	钛镁系瓷·····	9-27
钡长石瓷·····	9-23	钛锆系瓷·····	9-27
刚玉-莫来石瓷·····	9-23	铁电陶瓷·····	9-27
低碱瓷·····	9-23	低温烧结陶瓷·····	9-27
氧化铝瓷·····	9-23	镁-钨-钛系统陶瓷·····	9-28
氧化铍瓷·····	9-24	钛酸钡-二钛钨-钛酸锶系统陶瓷·····	9-28
氧化镁瓷·····	9-24	半导体陶瓷·····	9-28
氮化硼瓷·····	9-24	压电陶瓷·····	9-29

反铁电陶瓷.....	9-29	二元系陶瓷.....	9-30
透明铁电陶瓷.....	9-29	锆钛酸铅陶瓷.....	9-30
钛酸钡陶瓷.....	9-29	三元系陶瓷.....	9-30
钛酸铅陶瓷.....	9-29	铌酸盐系陶瓷.....	9-31

三、压电、铁电晶体

晶体.....	9-32	钛酸钡.....	9-38
压电晶体.....	9-32	钽铌酸钾.....	9-38
石英晶体.....	9-32	铌酸锂.....	9-39
β 石英.....	9-33	钽酸锂.....	9-39
α 石英.....	9-33	铌酸钡钠.....	9-39
左旋石英.....	9-33	铌酸锶钡.....	9-40
右旋石英.....	9-33	碘酸锂.....	9-40
石英的坐标轴.....	9-33	镓酸锂.....	9-40
光轴.....	9-33	锗酸锂.....	9-41
电轴.....	9-33	钛酸镧.....	9-41
机械轴.....	9-33	锗酸铋.....	9-41
光双晶.....	9-33	锗酸铅.....	9-41
电双晶.....	9-34	硅酸铋.....	9-42
石英元件.....	9-34	二氧化碲.....	9-42
石英振子.....	9-34	对位黄碲矿晶体.....	9-42
切型.....	9-34	氟化钡锰.....	9-42
切型符号.....	9-34	硫碘化铋.....	9-42
热释电晶体.....	9-35	钼酸钆.....	9-43
铁电晶体.....	9-35	锗钒酸铅.....	9-43
反铁电晶体.....	9-36	硫砷铊.....	9-43
电光晶体.....	9-36	钼酸铅.....	9-43
声光晶体.....	9-36	钨酸碲.....	9-44
酒石酸钾钠.....	9-36	氮化铝.....	9-44
罗息盐.....	9-36	硫化汞.....	9-44
息格涅特盐.....	9-36	朱砂.....	9-44
磷酸二氢铵.....	9-36	硫化镉.....	9-44
磷酸二氢钾.....	9-37	氧化锌.....	9-45
磷酸二氘钾.....	9-37	钛酸铋.....	9-45
砷酸二氘铯.....	9-37	硫酸三甘肽.....	9-45
铌酸钾.....	9-38	三甘氨酸硫酸盐.....	9-45

四、工 艺

- 原材料的混合.....9-46
 预烧.....9-46
 粉碎.....9-46
 气流粉碎.....9-46
 振动磨.....9-46
 球磨.....9-46
 助磨剂.....9-47
 颗粒度测定.....9-47
 筛分析法.....9-47
 沉降分析法.....9-47
 除铁.....9-47
 压滤.....9-47
 喷雾干燥.....9-48
 真空练泥.....9-48
 陈腐.....9-48
 捏练.....9-48
 打粉.....9-48
 预压.....9-48
 造粒.....9-48
 成型.....9-48
 干压.....9-49
 注浆.....9-49
 挤压.....9-49
 热压铸.....9-49
 流延法薄膜成型.....9-49
 轧膜.....9-50
 热压.....9-50
 等静压.....9-51
 高温等静压.....9-51
 干燥.....9-52
 修整.....9-52
 匣钵.....9-52
 排蜡.....9-52
 焙烧.....9-52
 烧成.....9-52
 烧后加工.....9-52
 上釉.....9-52
 高温釉.....9-53
 低温釉.....9-53
 金属化.....9-53
 极化.....9-53
 焰熔法.....9-53
 水热法.....9-53
 助熔剂提拉法.....9-54
 熔盐法.....9-54
 助熔剂法.....9-54
 水溶液降温析晶法.....9-54
 水溶液蒸发结晶法.....9-54
 晶体光轴的测定.....9-55
 光学晶体的切割.....9-55
 光学晶体的研磨.....9-55
 光学晶体的抛光.....9-55
 定向.....9-55
 X射线定向.....9-56
 腐蚀定向.....9-56
 光学定向.....9-56
 切割.....9-56
 外刃切割.....9-56
 内刃切割.....9-56
 研磨.....9-56
 行星研磨.....9-56
 粘板研磨.....9-56
 磨边.....9-56
 磨圆.....9-57
 磨球面.....9-57
 抛光.....9-57
 被电极.....9-57
 烧银点.....9-57
 金属层牢化.....9-57
 焊电极引线.....9-57
 调频.....9-57
 校频.....9-58

组装.....	9-58	排气.....	9-58
封口.....	9-58	测试.....	9-58

五、应 用

陶瓷滤波器.....	9-59	压电加速度计.....	9-65
低频陶瓷滤波器.....	9-59	压电高温计.....	9-66
中频陶瓷滤波器.....	9-59	压电流量计.....	9-66
高频陶瓷滤波器.....	9-60	压电陶瓷延迟线.....	9-66
多重模式滤波器.....	9-60	石英谐振器.....	9-67
压电陶瓷鉴频器.....	9-60	石英晶体滤波器.....	9-67
压电音叉.....	9-61	单片石英晶体滤波器.....	9-68
压电陶瓷气体火花塞.....	9-61	石英晶体振荡器.....	9-68
压电打火机.....	9-62	电压控制石英晶体振荡器.....	9-68
压电压力计.....	9-62	温度补偿石英晶体振荡器.....	9-68
压电厚度计.....	9-62	高稳定度石英晶体振荡器.....	9-69
陶瓷变压器.....	9-62	负载电容.....	9-69
陶瓷直流电源变换器.....	9-63	等效串联电阻.....	9-69
压电角速度传感器.....	9-64	等效并联电阻.....	9-69
压电陀螺.....	9-65	激励电平.....	9-69

一、物理基础[●]

晶系

crystal system

根据晶体的宏观对称点,按坐标系的性质可以将各种晶体归纳为七大晶系,即:三斜,单斜,斜方(正交),三方(三角),四方(正方、四角),六方(六角),立方(等轴)晶系。

晶体外形的这种规律性乃是晶体内部微观对称的表现形式。晶体内部微观质点在空间作有规律的排列,呈点阵结构。在七大晶系中共有14种空间点阵。

点阵

lattice

晶体的内部结构可以概括为由一些相同的化学质点在空间有规律地作周期性的无限分布。这些化学质点(代表原子、离子、分子或其集团的重心)的分布总体叫做点阵,也称格子。见“晶系”。

七大晶系中共有14种空间点阵,即:原始三斜,原始单斜,底心单斜,原始斜方,底心斜方,体心斜方,面心斜方,六方(六角),三方(三角),原始四方(原始四角),体心四方(体心四角),原始立方,体心立方,面心立方。

点群

point group

晶体的宏观对称性可用存在于晶体外形上的对称要素表示。宏观对称要素包括:对称面(用国际符号 m 表示)、对称心(i)、对称轴(n)和反轴(\bar{n})等。晶体可只存在一个对称要素,也可有多个对称要素按一定方式的组合。由于晶体外形是有限的空间,在对

晶体的32种点群符号

晶系名称	点 群 符 号		
	国际符号		熊夫利符号
三斜	1		C_1
	$\bar{1}$		C_1
单斜	2		C_2
	m		C_s
	$\frac{2}{m}$		C_{2h}
斜方 (正交)	2	2	D_2
	2	m	C_2
	$\frac{2}{m}$	$\frac{2}{m}$	D_{2h}
三方(三角,菱形)	3		C_3
	$\bar{3}$		C_{3i}
	3	2	D_3
	3	m	C_{3i}
	$\frac{3}{m}$	$\frac{2}{m}$	D_{3d}
四方(四角,正方)	4		C_4
	$\frac{4}{m}$		S_4
	$\frac{4}{m}$		C_{4h}
	4	2	D_4
	4	m	C_{4v}
	4	2	D_{2d}
	$\frac{4}{m}$	$\frac{2}{m}$	D_{4h}
六方(六角)	6		C_6
	$\bar{6}$		C_{3h}
	$\frac{6}{m}$		C_{6h}
	6	2	D_6
	6	m	C_{6v}
	6	m	D_{3h}
	$\frac{6}{m}$	$\frac{2}{m}$	D_{6h}
	$\frac{6}{m}$	$\frac{2}{m}$	D_{6h}
立方(等轴)	2	3	\bar{T}
	2	3	T_h
	m	3	T_h
	4	3	O
	4	3	T_d
	$\frac{4}{m}$	$\frac{3}{m}$	O_h

● 晶体的电光效应、光弹性效应、声光效应、非线性光学效应等特性,参见第二十八章激光技术。振动模式方面,除本节所列外,另参见第三十章超声。

称要素组合时, 必须通过一公共点 (即至少有一点不动)。另外, 晶体是一种点阵结构, 对称要素组合的结果不允许产生与点阵结构不相容的对称要素 (即 $n=1, 2, 3, 4, 6; \bar{n}=\bar{1}, \bar{2}, \bar{3}, \bar{4}, \bar{6}$)。故晶体宏观对称要素组合, 可以得到 32 种对称类型。称之为 32 种点群。点群是指与点操作相应的对称要素群, 其中最少有一点不动。

表示 32 种点群的符号有两种, 一种称为熊夫利符号, 一种为国际符号 (见上表)。两者可以连用, 例如属于三方晶系的铌酸锂, 点群对称性为 $C_{3v}-3m$ 。本词典采用国际符号。

晶类

crystal class

即“点群”。

空间群

space group

空间群是晶体结构内部由宏观对称要素和微观对称要素组合而成的对称群。除宏观对称要素外, 晶体的微观对称要素还有平移轴、滑移对称面和螺旋对称轴等。将全部对称要素进行组合可以产生 230 种对称类型, 称为 230 种空间群, 它们分属于 32 种点群中。

常用的空间群符号有两种:

(1) 熊夫利符号: 在熊夫利点群符号的上方加一个指数。

(2) 国际符号: 在国际点群符号前面加一个点阵类型符号。点阵类型符号及意义如下:

- P 代表简单点阵;
- A 代表(100)底心点阵;
- B 代表(010)底心点阵;
- C 代表(001)底心点阵;
- F 代表面心点阵;
- I 代表体心点阵;
- R 代表三方简单点阵。

1, 2, 3, 4, 6 代表对称轴;

$\bar{1}, \bar{2}, \bar{3}, \bar{4}, \bar{6}$ 代表象转轴, $\bar{1}$ 为对称中心, $\bar{2}$ 为对称面;

m 代表对称面, 当对称面垂直结点轴时以 $\frac{2}{m}, \frac{3}{m}, \frac{4}{m}, \frac{6}{m}$ 等表示;

$b_1, b_2, b_3, \dots, 4_1, 4_2, 4_3, \dots$ 等代表螺旋对称轴;

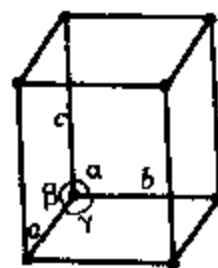
a, b, c, d, n 代表滑移反映面。

习惯上两种符号连用, 例如, 属于体心等轴晶系的钇铝石榴石, 其空间群为 $O_h^{10}-Ia3d$ 。

三斜晶系

triclinic system

三斜晶系的晶体构造为: $a \neq b \neq c$, $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$ 。此晶系有长短不等三个晶轴, 互相斜交 (见图)。

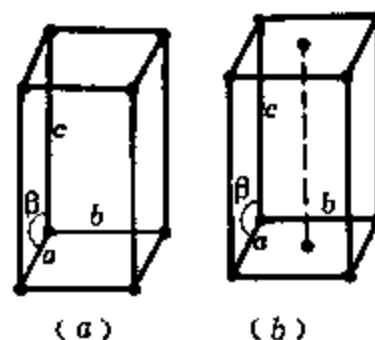


三斜晶系结构简图

单斜晶系

monoclinic system

单斜晶系的晶体构造为: $a \neq b \neq c$, $\alpha = \gamma = 90^\circ, \beta \neq 90^\circ$ 。单斜晶系包括有原始单斜和底心单斜二种结构 (见图)。



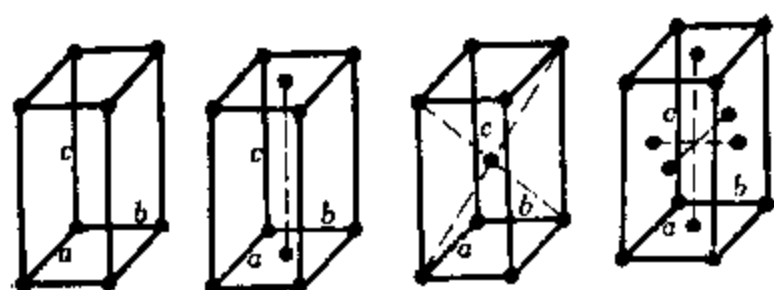
单斜晶系结构简图

a—原始单斜, b—底心单斜。

斜方晶系

orthorhombic system

斜方晶系又称正交晶系, 其结构形状和火柴盒相似, 其晶体构造为: $a \neq b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ 。斜方晶系包括有原始斜方、底心斜方、体心斜方和面心斜方四种结构 (见图)。



(a) (b) (c) (d)

斜方晶系结构简图

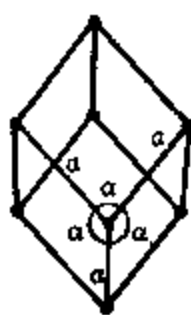
a—原始斜方; b—底心斜方;

c—体心斜方; d—面心斜方。

三方晶系

trigonal system

三方晶系又称三角晶系, 其晶体构造为: $a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$ (见图)。

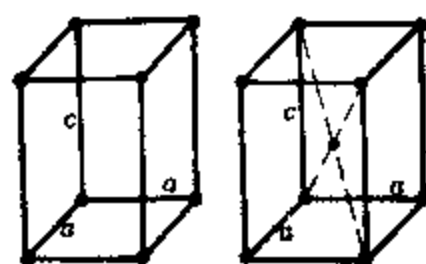


三方晶系结构简图

四方晶系

tetragonal system

四方晶体又称四角晶系, 也称正方晶系, 其晶体构造为: $a = b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ 。四方晶系包括有原始四方和体心四方两种结构 (见图)。



(a) (b)

四方晶系结构简图

a—原始四方; b—体心四方。

六方晶系

hexagonal system

六方晶系又称六角晶系, 其晶体构造为: $a = b \neq c$, $\alpha = \beta = 90^\circ$, $\gamma = 120^\circ$ (见图)。

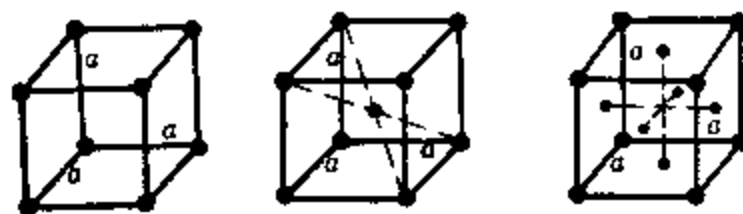


六方晶系结构简图

立方晶系

cubic system

立方晶系又称等轴晶系, 其晶体构造为: $a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ 。立方晶系包括有原始立方、体心立方和面心立方三种结构 (见图)。



(a) (b) (c)

立方晶系结构简图

a—原始立方; b—体心立方; c—面心立方。

等轴晶系

isometric system

即“立方晶系”。

原始格子

primitive lattice; simple lattice

结点只分布于晶胞的角顶的空间格子称

为原始格子(P), 或称简单格子。见“斜方晶系”图 a 。

底心格子

base centred lattice

结点只分布于晶胞的角顶和一对面的中心的空格子称为底心格子(C)。见“斜方晶系”图 b 。

体心格子

body centred lattice

结点只分布于晶胞的角顶和平行六面体的中心的空格子称为体心格子(I)。见“斜方晶系”图 c 。

面心格子

face centred lattice

结点只分布于晶胞的角顶和每个面的中心的空格子称为面心格子(F)。见“斜方晶系”图 d 。

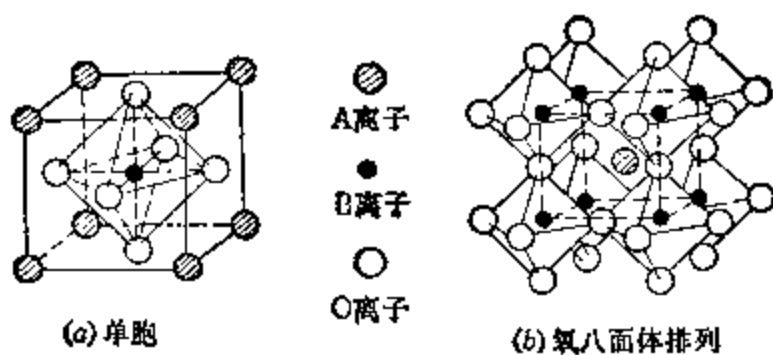
钙钛矿型结构

perovskite structure

目前压电铁电陶瓷中应用最广泛的 BaTiO_3 , PbTiO_3 , $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$, $\text{K}_x\text{Na}_{1-x}\text{NbO}_3$ 等都属于钙钛矿型结构。这种结构可用 ABO_3 的形式来表示: 其中 A 代表二价的正离子 (如 Pb^{2+} , Ba^{2+}) 或一价的正离子 (如 K^+ , Na^+); B 代表四价的正离子 (如 Ti^{4+} , Zr^{4+}) 或五价的正离子 (如 Nb^{5+})。

钙钛矿型结构可以看成是“氧八面体”组成的 (见图)。

钙钛矿型结构各离子最密堆积 (各离子



钙钛矿型的晶格结构

之间的空隙最小) 的条件为:

$$r_A + r_O = \sqrt{2} (r_B + r_O)$$

为了使它与实际相符必须为:

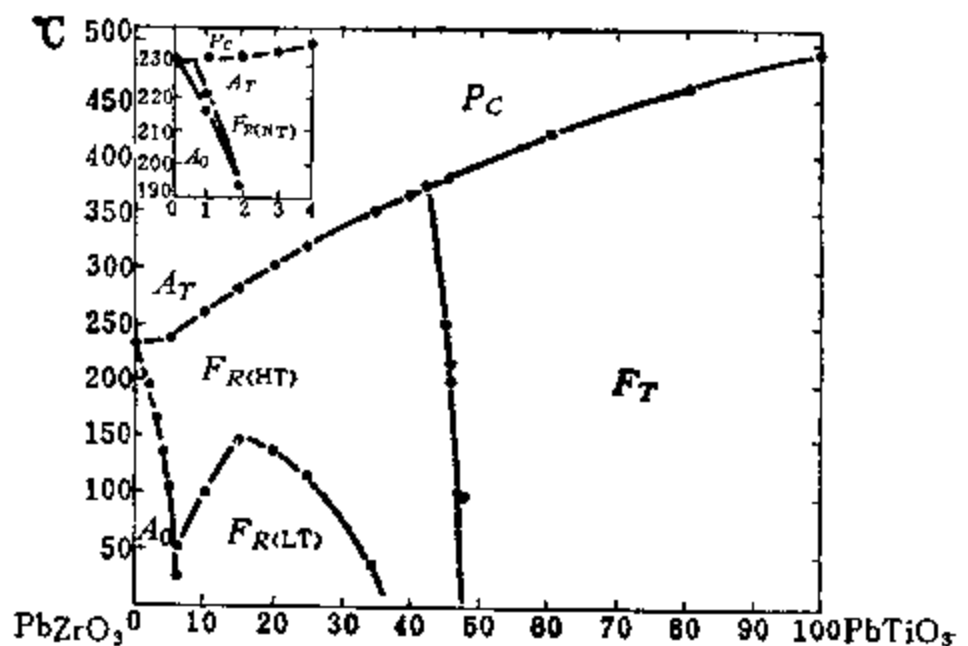
$$r_A + r_O = t\sqrt{2} (r_B + r_O)$$

式中, r_A , r_B , r_O 分别为 A 离子、 B 离子和氧 (O) 离子的半径。 t 为容限因子, 其值为 $0.9 \sim 1.1$ 。

相图

phase diagram

用来表示在化学平衡的条件下, 组份、相结构和温度的变化关系的图, 称为相图 (见图)。



PbTiO_3 - PbZrO_3 系相图

自发极化

spontaneous polarization

在没有外电场的作用时, 某些晶体中存在着电偶极子的规则排列而产生的极化, 称为自发极化。自发极化是个向量。自发极化与感应极化不同, 它是物质本身特殊的内部结构所固有的电极化, 不是由外电场的作用而发生的。只有在结构上属于十种点群对称性的晶体, 才可能有自发极化。这十种点群是: $1, m, 2, 2mm, 4, 4mm, 3, 3m, 6, 6mm$ 。

在垂直于极化轴的表面上, 单位面积的自发极化电荷量称为自发极化强度, 多以 P_s 表示, 实用制单位是库仑/米²。

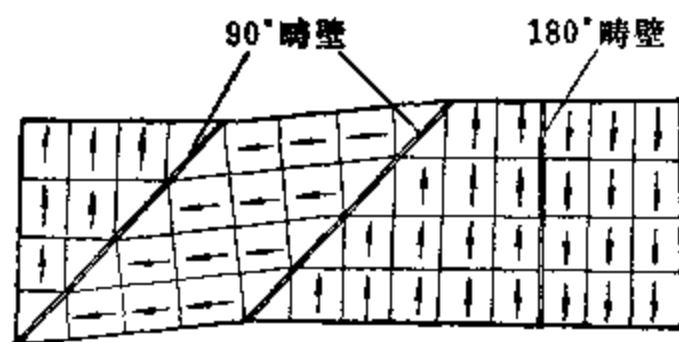
铁电性**ferroelectricity**

某些晶体在一定温度范围内具有自发极化, 而且其自发极化方向可以因外电场而反向, 晶体的这种特性称为铁电性。具有铁电性的晶体称为铁电体, 之所以称为铁电体, 是因为它与铁磁体在许多物理性质上具有一一对应之处(如电滞回线对应磁滞回线, 电畴对应磁畴, 顺电-铁电相变对应顺磁-铁磁相变, 电矩对应磁矩等)。铁电体的介电性能随温度变化的关系呈现异常特性, 在居里温度处, 介电常数出现极大值, 在居里温度以上, 介电常数随温度的变化遵从居里-外斯定律。

铁电畴**ferroelectric domains**

在铁电晶体的内部, 自发极化方向一致的区域称为铁电畴, 两个畴之间的界面称为畴壁。某些铁电体(例如铌酸锂)的自发极化仅具有两个可能的(反平行)取向, 故畴壁所分开的是反平行畴, 这种畴壁称为 180° 畴壁(见图)。某些铁电体(例如钛酸钡)的自发极化具有两个以上的可能取向, 因此可能出现更复杂的畴结构。分开自发极化方向互成直角的两个畴的畴壁, 称为 90° 畴壁。晶体如果仅由一个畴组成, 则称为单畴晶体。但是, 通常晶体是多畴的。多畴晶体通过极化处理, 可变成单畴晶体。

铁电畴可以用化学腐蚀法、偏光显微镜法、带电粉末沉淀法、液晶法等多种方法来

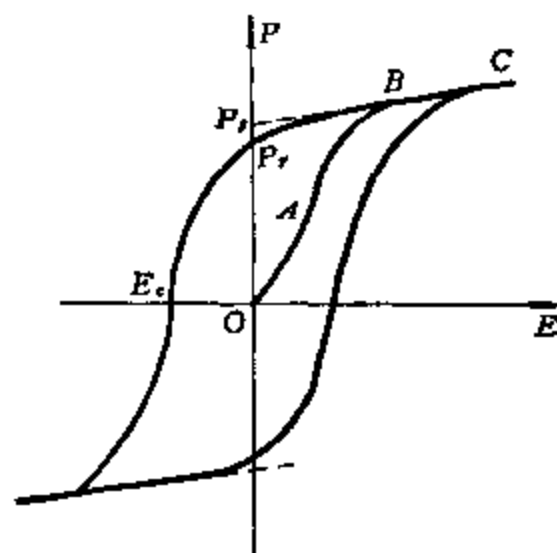


四角晶体的 90° 畴壁和 180° 畴壁示意图
(箭头表示自发极化方向)

观察。

电滞回线**ferroelectric hysteresis loop**

当对铁电晶体施加外电场 E 时, 在电场较强的情况下, 铁电体的极化强度 P 并不是随外电场作线性变化的, 而是在一定温度范围内, P 表现为 E 的双值函数, 呈现出滞后回线的关系, 如图所示。这个 P - E 回线就称为电滞回线。



铁电体的电滞回线

由电滞回线可以测量出铁电体在外电场为零时的剩余极化强度 P_r (回线在纵轴上的截距)和矫顽场强 E_c (回线在横轴上的截距)。矫顽场强 E_c 就是使极化强度重新为零所需要的外电场强度。

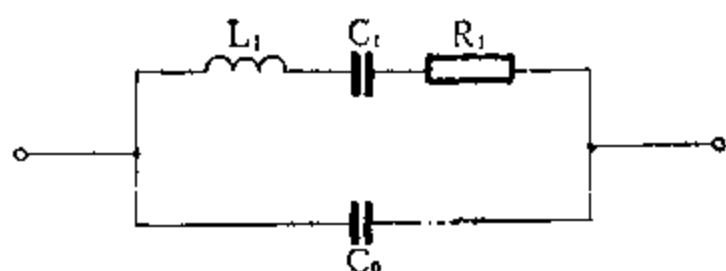
压电振子**piezoelectric vibrator**

被覆激励电极的压电体称为压电振子。

压电振子是弹性体, 具有固有谐振频率(f_0)。当施加在压电振子上的激励信号频率等于压电振子的固有谐振频率 f_0 时, 压电振子就产生谐振。此时输出的振幅最大, 弹性能也最大。压电振子通过逆压电效应而产生机械谐振; 这种机械谐振又可使压电振子通过正压电效应而输出电信号。

压电振子等效电路**equivalent circuit of piezoelectric vibrator**

用机电类比的方法, 将压电振子在谐振频率附近的参数和特性用一相应的电路来表示, 这个电路称为压电振子的等效电路 (见图)。



压电振子的等效电路

C_0 —并联电容 (相当于静电容); L_1 —动态电感;
 C_1 —动态电容; R_1 —动态电阻 (或称串联谐振电阻)。

最小阻抗频率

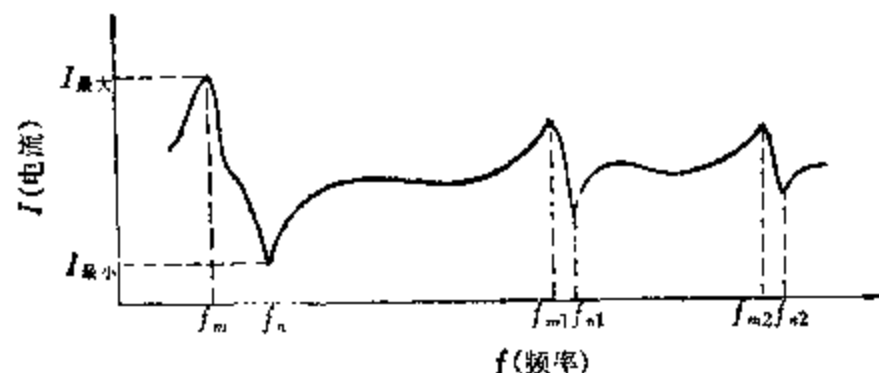
minimum impedance frequency

对压电振子施加交变信号, 当振子阻抗出现最小值 (或电流出现最大值) 时的频率, 称为最小阻抗频率, 或称最大导纳频率, 以 f_m 表示。

压电振子的阻抗随频率变化的特性, 也可用振子的电流随频率变化的特性来表示 (见图)。

如图所示, 当信号频率等于 f_m 时, 振子的电流最大而阻抗最小; 当信号频率等于最大阻抗频率 f_n 时, 振子的电流最小而阻抗最大。

如继续提高输入信号的频率还可有规律地出现一系列电流次最大值和次最小值。其相应的频率为 f_{m1} 和 f_{n1} , f_{m2} 和 f_{n2} , ...。



压电振子的电流频率变化的示意图

图中, 第一次出现的 f_m 和 f_n 称为基音频率; 其后依次出现的 f_{m1} 和 f_{n1} , f_{m2} 和 f_{n2} , ... 则按相应次数分别称为一次泛音频率, 二次泛音频率, ...。

最大导纳频率

maximum admittance frequency

即“最小阻抗频率”。

最大阻抗频率

maximum impedance frequency

对压电振子施加交变信号, 当振子阻抗出现最大值 (或电流出现最小值) 时的频率, 称为最大阻抗频率, 或称最小导纳频率, 以 f_n 表示 (见“最小阻抗频率”)。

最小导纳频率

minimum admittance frequency

即“最大阻抗频率”。

串联谐振频率

series resonance frequency

当压电振子加上交变信号, 呈现串联谐振时的频率, 称为串联谐振频率, 以 f_s 表示。理想的无损耗 ($R_1 = 0$, $Q_m = \infty$) 的压电振子的串联谐振频率由下式决定 (见“压电振子等效电路”图)。

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}}$$

并联谐振频率

parallel resonance frequency

当压电振子加上交变信号, 呈现并联谐振时的频率, 称为并联谐振频率, 以 f_p 表示。理想的无损耗 ($R_1 = 0$, $Q_m = \infty$) 的压电振子的并联谐振频率由下式决定 (见“压电振子等效电路”图)。

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 \frac{C_0 C_1}{C_0 + C_1}}}$$

谐振频率

resonance frequency

当压电振子加上交变信号在最小阻抗频

率(f_m)附近,存在一个电抗分量为零,信号电压与电流同相位的频率,这个频率称为压电振子的谐振频率,通常以 f_r 来表示。

反谐振频率

anti-resonance frequency

当电压振子加上交变信号,在最大阻抗频率(f_m)附近,存在一个电纳分量为零,信号电压与电流同相位的频率,这个频率称为压电振子的反谐振频率,通常以 f_a 来表示。

基音频率

fundamental frequency

对于给定的振动模,最低的谐振频率,称为基音频率(或简称基频)。见“最小阻抗频率”。

泛音频率

overtone frequency

对于给定的振动模,基频以外出现的谐振频率,称为泛音频率。见“最小阻抗频率”。

标称频率

nominal frequency

石英谐振器频率的标称值。

寄生频率

unwanted frequency

石英谐振器标称频率以外的谐振频率。

频率稳定度

frequency stability

在一定时间间隔和一定温度下,由于电路参数,工作条件和石英振子性能的变化,所引起的谐振器频率的相对变化,称为频率稳定度。

频率老化

ageing of frequency

石英谐振器在长期工作和存放中,谐振频率随时间的变化,称为频率老化。

频率温度系数

frequency-temperature coefficient

频率温度系数是温度的函数。在某一温度下,温度变化 1°C 时,频率的变化数值与

该温度下的标称频率的比值,称为频率温度系数。其数学表示式为:

$$\text{频率温度系数} = \frac{1}{f} \frac{df}{dT}$$

其中 f 为给定温度下的标称频率, df 为当温度变化 dT 时频率的变化值。

石英晶体的频率温度系数主要取决于切型,也与石英片的尺寸有关,所以适当的选择切型和石英片的尺寸,可以在一个较宽的温度范围内,使频率温度系数等于零或趋近于零。

在实际应用中一般使用的是固定温度范围内平均温度系数的概念。

零温度系数点

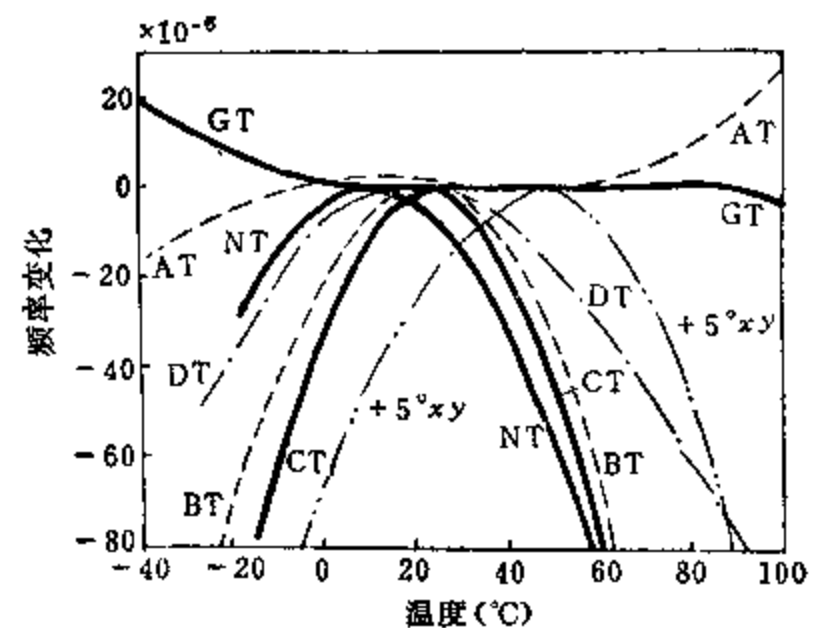
zero temperature coefficient point

频率温度系数等于零的温度,称为零温度系数点。高精度的石英谐振器必须在零温度系数点下进行工作。

频率温度特性

frequency temperature characteristics

用来表示石英谐振器的谐振频率随温度而变化的关系称为频率温度特性。常用切型的频率温度特性如图所示。



常用切型的频率温度特性

从图中看出, AT 切型的频率温度特性是一个三次曲线,频率温度特性比较好,在较宽的温度范围内频率变化比较小,是目前广泛采用的切型之一。特别是高精度石英谐

振器都采用 AT 切型。GT 切型的频率温度特性也是一个三次曲线, 由于加工复杂, 已很少采用。

从图中还可看出, 不少切型的频率温度特性是二次曲线。在较窄的温度范围内频率变化较小。如果要求石英谐振器能在较宽温度范围内工作时, 也可利用频率温度特性的变化规律, 采取适当的措施, 来减小在整个工作温度范围内的频率误差。

频率误差

frequency tolerance

由于制造公差、老化和工作温度等因素所引起的频率相对变化。

传输线路法

transmission circuit method

将压电振子接入一特定传输网络(见图)对其进行性能测量的方法, 称为传输线路法, 简称传输法。

当施加一个从低频到高频的可变信号时, 在与压电振子串联的电阻 R_T 上, 用电压表量出与压电振子电流最大 (I_{max}) 和电流最小 (I_{min}) 时相对应的电压, 并记下 I_{max} 时的频率 f_m 和 I_{min} 时的频率 f_n 。同时, 在 f_m 处, 用电阻箱以代替法测出压电振子的等效电阻 R_1 。

为了避免线路中杂散电容和外界感应对测量的影响, 一般均将测量线路置于金属盒

内, 保证必要的屏蔽。

谐振-反谐振法

resonance-antiresonance method

即“传输线路法”。

压电效应

piezoelectric effect

对某些电介质施加机械力引起内部正负电荷中心相对位移而发生极化, 导致介质两端表面内出现符号相反的束缚电荷, 其电荷密度与外力成比例, 这种现象称为压电效应(或正压电效应)。反之, 如果将具有压电效应的介质置于外电场中, 由于电场的作用会引起介质内部正负电荷中心位移, 而这一位移又导致介质发生形变, 这种效应称为逆压电效应。

正压电效应

direct piezoelectric effect

见“压电效应”。

逆压电效应

converse piezoelectric effect

见“压电效应”。

电致伸缩效应

electrostrictive effect

电介质在电场的作用下会由于极化的变化而引起形变, 若形变与电场方向无关, 这个现象就称为电致伸缩效应。

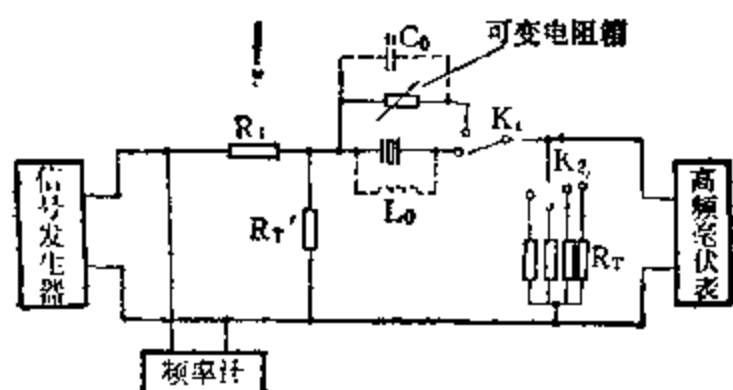
在考虑电介质的应变时, 除了要计入由于应力所产生的弹性应变之外, 还应该计入由于电场而产生的应变。实验表明: 外电场是小信号时, 电场与应变的关系是线性的, 可以用压电方程组来描述; 但在电场较大的情况下, 线性关系就不完全成立, 应变的大小与电场的平方成正比, 是一个二次方效应。

电致伸缩效应与逆压电效应不同, 后者是与电场方向有关的。

热释电效应

pyroelectric effect

由于温度变化, 某些压电晶体可出现结



传输法常用测量线路示意图

C_0 —压电振子的并联电容; L_0 —外加电感, 用以消除 C_0 对测量的影响; $R_1 \gg 10R_T'$; $R_T = R_T' \ll R_1$ 。

构上正负电荷中心的相对位移,从而在晶体两端产生异号的束缚电荷,这种现象称热释电效应。

铁弹性效应

ferro-elastic effect

某些晶体在一定温度范围内有自发应变,这个自发应变纯粹是由于本身的结构特性引起的。若对该晶体施加外应力,晶体的应变相对于外应力的变化有一个滞后现象,且外应力与应变的关系不是线性的而是形成回线的,有如铁电现象中外场与极化强度的关系那样,晶体的这种现象称为铁弹性效应。

弹性常数

elastic constant

任何物体在外力作用下都要发生不同程度的弹性形变,反映材料在外力与弹性形变之间关系的参数称为弹性常数。压电材料使用最多的是弹性柔顺常数(S_{ij})。另外也可用弹性刚度常数(C_{ij})来表示压电体的弹性性质。

弹性柔顺常数 S_{ij} 和弹性刚度常数 C_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, 6$) 都是对称 4 级张量,各有 21 个独立分量,对于压电陶瓷来说,实际上只有 5 个独立的弹性常数。

S_{ij} 和 C_{ij} 的第一个足标(i)表示应变的分量,第二个足标(j)表示应力的分量。

弹性柔顺常数

elastic compliance constant

弹性柔顺常数是表示物体在单位应力下所发生的应变,它通常用 S_{ij} 来表示。对具有压电效应的材料,因测量该常数的电学边界条件不同,得到的弹性常数也不相同。

常用的 S_{ij}^E 系指在外电场恒定时所测得的材料弹性柔顺常数,即在外电路电阻很小,相当于短路情况下所测得的常数,因此 S_{ij}^E 也可称为短路弹性柔顺常数。对压电陶瓷而言, S_{ij}^E 包括: $S_{11}^E, S_{12}^E, S_{13}^E, S_{33}^E$ 和 S_{55}^E 等 5 个独立的分量,另外还有 $S_{66}^E =$

$2(S_{11}^E - S_{12}^E)$ 。

S_{ij}^D 系指在电位移恒定时所测得的弹性柔顺常数,即在外电路电阻很大,相当于开路情况下所测得的常数,因此 S_{ij}^D 也可称为开路弹性柔顺常数。 S_{ij}^D 的独立分量也有 5 个,与 S_{ij}^E 同。

弹性柔顺常数的单位是 $\text{米}^2/\text{牛顿}$ 。

弹性刚度常数

elastic stiffness constant

弹性刚度常数是表示使物体产生单位应变所需要的应力,它通常用 C_{ij} 来表示。对具有压电效应的材料,因测量该常数的电学边界条件不同,得到的弹性常数也不相同。

C_{ij}^E 系指在外电场恒定时所测得的材料弹性刚度常数。压电陶瓷的 C_{ij}^E 包括: $C_{11}^E, C_{12}^E, C_{13}^E, C_{33}^E$ 和 C_{55}^E 等 5 个独立的分量,另外还有 $C_{66}^E = \frac{1}{2}(C_{11}^E - C_{12}^E)$ 。

C_{ij}^D 系指在电位移恒定时所测得的材料弹性刚度常数, C_{ij}^D 独立分量也有 5 个,与 C_{ij}^E 同。

弹性刚度常数的单位是 $\text{牛顿}/\text{米}^2$ 。

机械品质因数

mechanical quality factor

压电振子在谐振时贮存的(机械)能量与在一个周期内损耗的(机械)能量之比叫做机械品质因数。它反映压电体振动时因克服内摩擦而消耗能量的大小,是衡量压电材料性能的一个重要参数。一般用 Q_m 表示:

$$Q_m = \frac{2\pi f_s L_1}{R_1} = \frac{1}{2\pi f_s |Z_m| (C_0 + C_1) \left(\frac{f_p^2 - f_s^2}{f_p^2} \right)}$$

式中 f_s ——串联谐振频率;

f_p ——并联谐振频率;

L_1 ——动态电感;

$|Z_m|$ ——最小谐振阻抗。

在实际应用中, Q_m 可用近似式算出:

$$Q_m \approx \frac{1}{4\pi C_f R_1 \Delta f}$$

式中 C_f ——测试频率远低于 f_r 时测得的压电振子的低频电容 ($C_f = C_0 + C_1$);

Δf ——振子反谐振频率 f_a 与谐振频率 f_r 之差;

R_1 ——谐振时串联等效电阻。

一般可用传输线路法测出 Δf 和 R_1 , 用电容电桥法测出 C_f , 然后算出 Q_m 。

压电振子的“优值”

figure of merit of piezoelectric vibrator

压电振子的机械品质因数 (Q_m) 与电容比之比值称为压电振子的“优值” (M)。以下式表示:

$$M = \frac{Q_m}{Y} = \frac{1}{2\pi f_r R_1 C_0} \approx \frac{1}{2\pi f_m (C_0 + C_1) |Z_m|}$$

式中 f_m ——最小阻抗频率 (赫);

$|Z_m|$ ——最小谐振阻抗 (欧);

Y ——振子的电容比, $Y = C_0/C_1$;

C_0 ——并联电容;

C_1 ——动态电容;

f_r ——串联谐振频率。

泊松比

Poisson's ratio

泊松比是指各向同性物体在应力作用下的横向相对收缩与纵向相对伸长之比。由于压电陶瓷在垂直于极化轴的平面内是呈现各向同性的, 它可表示为

$$\sigma^E = -\frac{S_{12}^E}{S_{11}^E}$$

式中 S_{12}^E 和 S_{11}^E 为压电材料在恒定电场下的弹性柔顺常数。

压电材料的泊松比 σ^E , 可由测出薄圆片振子的径向基音频率和泛音频率经计算来得到。

横纵方向变形尺寸比

cross contraction ratio

即“泊松比”。

铁电居里点

ferroelectric Curie point

铁电晶体只在某一温度范围内具有铁电性。当温度到达某一临界值时, 晶体就由铁电相转变为非铁电相, 自发极化也随之消失。这个临界温度称为铁电居里点。在居里点处, 晶体的介电、压电、光学、弹性以及热学等性质均出现反常现象 (如介电常数出现最大值等)。

大多数铁电体只有一个居里点, 例如钛酸钡, 居里点为 120°C 。少数铁电体可有两个居里点, 例如罗谢尔盐, 上居里点为 35°C , 下居里点为 -22°C , 在 $-22 \sim 35^\circ\text{C}$ 范围内具有铁电性。另有少数铁电体没有居里点, 例如六水合硫酸铝胍族 (即 GASH 族) 以及酸式亚硒酸锂 [即 $\text{LiH}_2(\text{SeO}_3)_2$] 等, 可以认为它们在未到达居里温度之前, 即已分解或溶化。

介质隔离率

dielectric impermeability

表示电介质的电场随电位移矢量变化的系数, 称为介质隔离率 β_{ij} 。它是一个对称二阶张量, 有六个独立分量, 可表示为

$$E_i = \sum_{j=1}^3 \beta_{ij} D_j \quad (i, j = 1, 2, 3)$$

介质隔离率 β_{ij} 的实用制单位为米/法。

自由介电常数

free dielectric constant

介质在恒定应力 (自由状态) 下的介电常数称为自由介电常数, 常用 ϵ_{mn}^T 表示。

ϵ_{mn}^T 的上角标 T 表示应力为恒定, 第一个足标 m 表示电位移分量的方向, 第二个足标 n 表示电场分量的方向。

对于压电陶瓷, 独立的介电常数只有两

个, 即 ϵ_{11} 和 ϵ_{33} 。 ϵ_{11}^T 代表在自由状态(即恒定应力)下, 样品受 x 轴向的电场作用且沿着 x 轴向产生电位移所对应的介电常数。 ϵ_{33}^T 代表在自由状态下, 样品受 z 轴向的电场作用且沿着 z 轴向产生电位移所对应的介电常数。

通常用频率远低于振子谐振频率的低频信号测出自由介电常数 ϵ_{mn}^T 。

受夹介电常数

clamped dielectric constant

介质在恒定应变(受夹状态)下的介电常数称为受夹介电常数, 常用 ϵ_{mn}^S 表示。

ϵ_{mn}^S 的上角标 S 表示应变为恒定, 第一个足标 m 表示电位移分量的方向, 第二个足标 n 表示电场分量的方向。

对于压电陶瓷, 独立的介电常数只有两个, 即 ϵ_{11} 和 ϵ_{33} 。 ϵ_{11}^S 代表在受夹状态(即恒定应变)下, 样品受 x 轴向的电场作用且沿着 x 轴向产生电位移所对应的介电常数。 ϵ_{33}^S 代表在受夹状态下, 样品受 z 轴向的电场作用且沿着 z 轴向产生电位移所对应的介电常数。

一般可通过高频受夹的方法测得材料的 ϵ_{mn}^S 值。所谓高频受夹, 是指在远高于样品的谐振频率时样品应变可视为恒定。

电学品质因数

electrical quality factor

介质材料的电学品质因数通常用 Q_e 来表示, 它实际上是介质损耗($\text{tg}\delta$)的倒数, 即 $Q_e = \frac{1}{\text{tg}\delta} = \omega CR$ 。式中, ω 表示交变电场的角频率; C 表示介质样品的静电容; R 是介质中存在的损耗电阻。

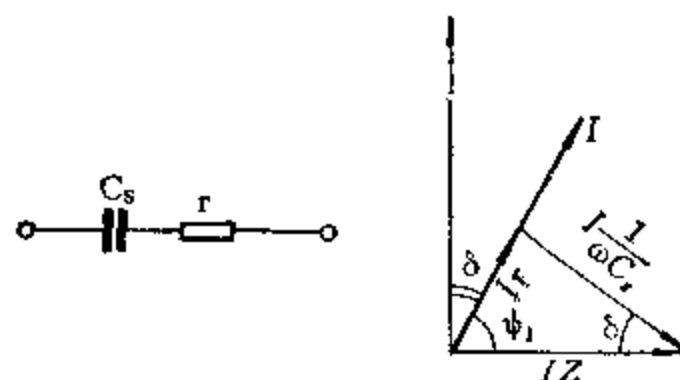
$\text{tg}\delta$ 和 Q_e 都是无量纲的物理量见“介质损耗”。

介质损耗

dielectric loss

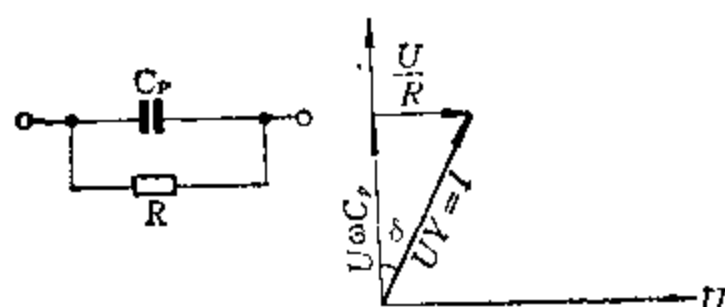
电介质在电场作用下引起发热而消耗的

能量叫做介质损耗。通常以损耗角正切值($\text{tg}\delta$)来表示电介质损耗的大小($\text{tg}\delta$ 又称为损耗因子)。有两种等效电路和计算方法(见图)。



串联等效电路

$$\text{tg}\delta = \omega C_s r$$



并联等效电路

$$\text{tg}\delta = \frac{1}{\omega C_p R}$$

损耗因子

dissipation factor

即 $\text{tg}\delta$, 见“介质损耗”。

压电常数

piezoelectric constant

压电体把机械能变为电能, 或把电能变为机械能的转换系数, 称压电体的压电常数。

压电常数是压电材料所特有的一组重要参数, 它反映材料的弹性性质(机械性质)与介电性质之间的耦合关系。压电常数不仅与应力 T 、应变 S 有关, 而且与电场强度 E 、电位移 D 有关。因此, 压电体的压电常数可从不同的角度来表达, 其形式共有四种, 即 $d_{ij}, g_{ij}, e_{ij}, h_{ij}$ ($i = 1, 2, 3; j = 1, 2, \dots, 6$)。

压电常数 d_{ij}, g_{ij}, e_{ij} 和 h_{ij} 的第一个足标表示电学量的方向(即电场或电位移的方向), 第二个足标表示力学量的方向(即应力或应变的方向)。

压电常数 d_{ij} piezoelectric constant d_{ij}

当压电体处于应力为恒定时, 由于电场强度变化所产生的应变变化(∂s)与电场强度变化(∂E)之比, 或电场为恒定时由于应力变化所产生的电位移变化(∂D)与应力变化(∂T)之比, 称为压电常数 d_{ij} ($i=1, 2, 3; j=1, 2, \dots, 6$)。 d_{ij} 也叫做压电应变常数, 可表示为:

$$d = \left(\frac{\partial S}{\partial E} \right)_T = \left(\frac{\text{应变变化}}{\text{电场强度变化}} \right)_{\text{应力恒定}}$$

或

$$d = \left(\frac{\partial D}{\partial T} \right)_E = \left(\frac{\text{极化强度变化}}{\text{应力变化}} \right)_{\text{电场恒定}}$$

压电陶瓷的压电常数 d_{ij} 实际上只有三个独立分量 (d_{31}, d_{33}, d_{15}), 它的单位是库仑/牛顿或米/伏。

压电应变常数

piezoelectric strain constant

即“压电常数 d_{ij} ”。**压电常数 g_{ij}** piezoelectric constant g_{ij}

当压电体在电位移为恒定时, 由于应力变化所产生的电场强度变化(∂E)与应力变化(∂T)之比, 或当应力为恒定时, 由于电位移变化所产生的应变变化(∂S)与电位移变化(∂D)之比, 称为压电常数 g_{ij} ($i=1, 2, 3; j=1, 2, \dots, 6$)。 g_{ij} 也叫做压电电压常数, 可表示为:

$$g = \left(-\frac{\partial E}{\partial T} \right)_D = \left(\frac{\text{电场强度变化}}{\text{应力变化}} \right)_{\text{电位移恒定}}$$

或

$$g = \left(\frac{\partial S}{\partial D} \right)_T = \left(\frac{\text{应变变化}}{\text{电位移变化}} \right)_{\text{应力恒定}}$$

压电陶瓷只有三个独立的 g_{ij} 参数 (g_{31}, g_{33} 和 g_{15}), 它的单位是伏·米/牛顿或米²/库仑。

压电电压常数

piezoelectric voltage constant

即“压电常数 g_{ij} ”。**压电常数 e_{ij}** piezoelectric constant e_{ij}

当压电体在应变为恒定时, 由于电场强度变化所产生的应力变化(∂T)与电场强度变化(∂E)之比, 或在电场强度为恒定时, 由于应变变化所产生的电位移变化(∂D)与应变变化(∂S)之比, 称为压电常数 e_{ij} ($i=1, 2, 3; j=1, 2, \dots, 6$)。 e_{ij} 也叫做压电应力常数, 可表示为:

$$e = \left(-\frac{\partial T}{\partial E} \right)_S = \left(\frac{\text{应力变化}}{\text{电场强度变化}} \right)_{\text{应变恒定}}$$

或

$$e = \left(\frac{\partial D}{\partial S} \right)_E = \left(\frac{\text{电位移变化}}{\text{应变变化}} \right)_{\text{电场恒定}}$$

压电陶瓷只有三个独立的 e_{ij} 常数, 它们是 e_{31}, e_{33}, e_{15} 。 e_{ij} 的单位是牛顿/伏·米或库仑/米²。

压电应力常数

piezoelectric stress constant

即“压电常数 e_{ij} ”。**压电常数 h_{ij}** piezoelectric constant h_{ij}

当压电体在应变为恒定时, 由于电位移变化所产生的应力变化(∂T)与电位移变化(∂D)之比, 或在电位移为恒定时, 由于应变变化所产生的电场强度变化(∂E)与应变变化之比, 称为压电常数 h_{ij} ($i=1, 2, 3; j=1, 2, \dots, 6$)。 h_{ij} 也叫做压电劲度常数, 可表示为:

$$h = \left(-\frac{\partial T}{\partial D} \right)_S = \left(\frac{\text{应力变化}}{\text{电位移变化}} \right)_{\text{应变恒定}}$$

或

$$h = \left(-\frac{\partial E}{\partial S} \right)_D = \left(\frac{\text{电场强度变化}}{\text{应变变化}} \right)_{\text{电位移恒定}}$$

压电陶瓷只有三个独立的 h_{ij} 参数, 它们是 h_{31}, h_{33}, h_{15} 。 h_{ij} 单位是伏/米或牛顿/库仑。

压电劲度常数

piezoelectric stiffness constant

即“压电常数 k_{ij} ”。**机电耦合系数**

electromechanical coupling factor

机电耦合系数 k 是表示压电体中机械能和电能相互耦合强弱程度的一个参数。

由于压电现象中的机电转换同电工学中的电磁转换有十分相似之处, 所以压电体的机电耦合系数 k 可定义为

$$k = \frac{U_{12}}{\sqrt{U_1 U_2}}$$

式中 U_{12} 为弹性能与介电能相互作用的能量密度; U_1 为弹性能密度; U_2 为介电能密度; k 的含义为:

$$k^2 = \frac{\text{通过逆压电效应转换的机械能}}{\text{输入的总电能}}$$

或

$$k^2 = \frac{\text{通过正压电效应转换的电能}}{\text{输入的总机械能}}$$

它与各压电常数 (d 、 g 、 e 、 h) 的关系为:

$$k = \frac{U_{12}}{\sqrt{U_1 U_2}} = \sqrt{\frac{1}{\epsilon^T S^E}} d_{11} \\ = \sqrt{\frac{\epsilon^T}{S^E}} g_{11} = \sqrt{\frac{1}{\epsilon^T C^E}} e_{11} = \sqrt{\frac{\epsilon^S}{C^E}} h_{11}$$

式中 ϵ^S ——应变为恒量的介电常数;

ϵ^T ——应力为恒量的介电常数;

S ——电场强度为恒量的弹性柔顺常数;

C ——电场强度为恒量的弹性刚度常数。

压电陶瓷的基本耦合系数有五个, 即平面耦合系数 k_p 、横向耦合系数 k_{31} 、纵向耦合系数 k_{33} 、厚度耦合系数 k_t 和切变耦合系数 k_{15} 。

机电耦合系数 k 是压电体的一个重要参数, 它是设计器件时决定带宽的重要因素。

平面机电耦合系数

planar electromechanical coupling factor

平面机电耦合系数 k_p 是反映薄圆片沿径向伸缩振动时的机电耦合效应的一个参数, 通常也称径向耦合系数 (k_r)。

对于径向振动圆片, 设圆片很薄 (即直径远大于厚度), 且电场作用在厚度方向时, 根据运算得出 k_p 与串联谐振频率 f_s 和并联谐振频率 f_p 的关系式。但由于用该式直接计算 k_p 较困难, 故将其关系制成表。这样, 只要测得薄圆片的 f_s 、 f_p 和 σ^E (泊松比) 即可直接从表中查得 k_p 值。

一般情况下, 如果压电陶瓷薄圆片的 Δf ($\Delta f = f_p - f_s$) 值较小, 那么, k_p 的计算也可用下列一级近似式:

$$\text{当 } \sigma^E = 0.27 \text{ 时, } k_p^2 \approx 2.51 \frac{\Delta f}{f_s}$$

$$\text{当 } \sigma^E = 0.30 \text{ 时, } k_p^2 \approx 2.53 \frac{\Delta f}{f_s}$$

$$\text{当 } \sigma^E = 0.36 \text{ 时, } k_p^2 \approx 2.55 \frac{\Delta f}{f_s}$$

横向机电耦合系数

transverse electromechanical coupling factor

横向机电耦合系数 k_{31} 是反映沿厚度方向极化的薄长片, 在长度伸缩振动时的机电耦合效应的一个参数。

如图所示, 对于横向振动的薄长片, 设长度 l 沿 x 方向, 宽度为 w , 厚度为 t , 且 l 远大于 w 和 t , 极化方向和外电场方向均沿垂直于 lw 平面的 z 轴。长度和宽度方向的电场 E 等于零, 以及除 x 以外其它方向的应力 T 也等于零时, 振子在沿 z 轴方向的电场 E_3 的激励下, 只在 x 方向产生应力波, 于是可确定 k_{31} 与串联谐振频率 f_s 之间的关系。

为了方便, 现已将 k_{31} 与串联和并联谐振频率之间的关系制成表, 可直接查用。此外, k_{31} 也可从径向振动模的平面机电耦合

系数 k_p 值换算得到, 即

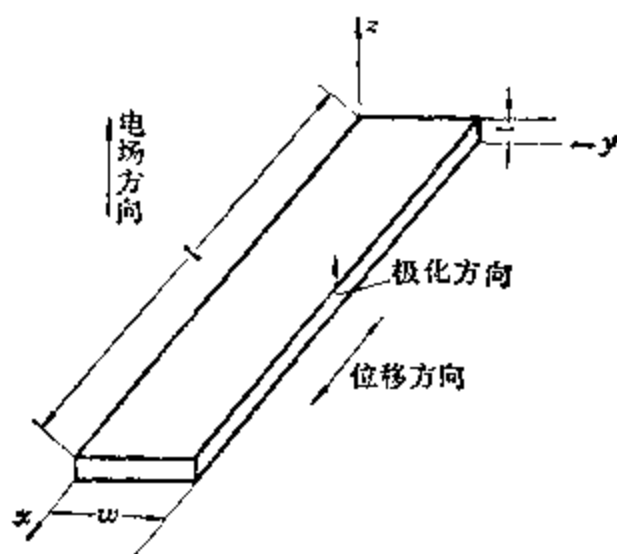
$$k_{31}^2 = k_p^2 (1 - \sigma^E) / 2$$

式中 σ^E 为材料的泊松比。

另外, 对于 Δf 较小的压电体, 也可按

$$k_{31}^2 \approx \frac{\pi^2}{4} \frac{\Delta f}{f_s} = 2.47 \frac{\Delta f}{f_s}$$

求得近似值。



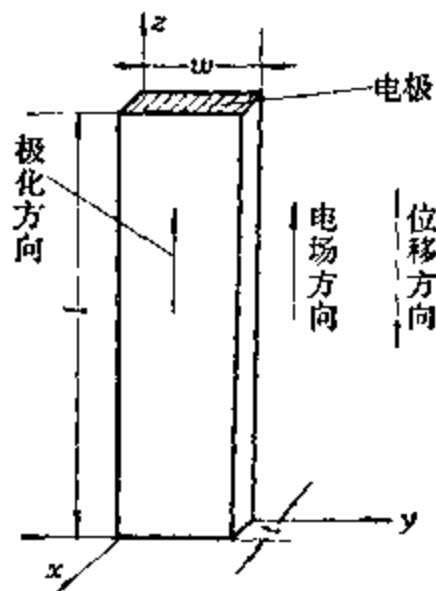
纵向耦合振子的坐标选取图

纵向机电耦合系数

longitudinal electromechanical coupling factor

纵向机电耦合系数 k_{33} 是反映细长棒沿长度方向极化且作长度伸缩振动时机电耦合效应的一个参数。

如图所示, 设棒的长度为 l , 宽度为 w , 厚度为 t , 电极涂在垂直于 z 轴的两个端面上, 并沿 z 轴极化, 且 l 远大于 w 和 t 。在



厚度耦合振子的坐标选取图

$D_1 = D_2 = 0$ (即 x 、 y 轴方向的电位移为零), 以及除 z 轴以外的其它方向上的应力 T 也等于零时, 振子在沿 z 轴的电场 E_3 的激励下, 只有轴向产生应力波, 这样就可确定 k_{33} 与串联和并联谐振频率 f_s 和 f_p 之间的关系。为了方便, 现已将 k_{33} 与 f_s 和 f_p 的关系制成表, 可直接查用。 k_{33} 可用下式计算求得:

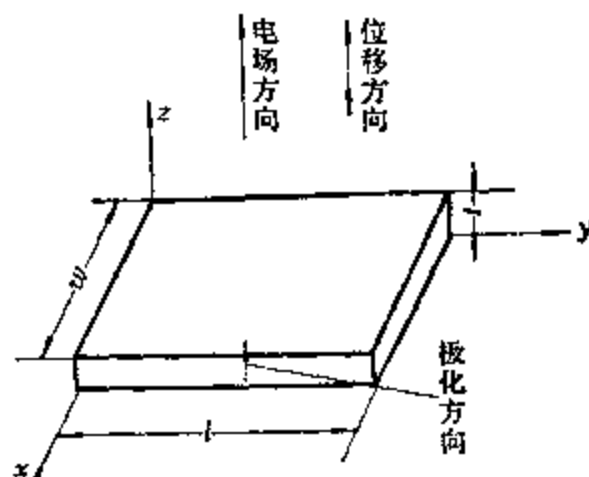
$$k_{33}^2 = \frac{\pi f_s}{2 f_p} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi \Delta f}{2 f_p} \right)$$

厚度振动机电耦合系数

thickness vibration electromechanical coupling factor

厚度振动机电耦合系数 k_t 是反映薄板作厚度伸缩振动时的机电耦合效应的一个参数。

如图所示, 设薄板厚度为 t , 长度宽度



厚度振动耦合振子坐标选取图

分别为 l 和 w , 沿 z 方向作人工极化处理并在与厚度方向相垂直的两表面上被覆电极和施加激励电场。如果振子横向尺寸远大于厚度, 则可以认为除沿厚度以外的其它方向上的应变为零, 而仅有沿厚度方向传播的平面波。对于没有漏电流的绝缘介质材料, 沿 z 轴方向的电位移可以看作恒定, 又由于电场沿厚度方向, 故 l 、 w 方向上的电位移为零, 于是可确定 k_t 与串联谐振频率 f_s 和并联谐振频率 f_p 之间的关系。

由于传输法测 k_t 比较困难, 一般可通过测自由介电常数 ϵ_{33}^T 和受夹介电常数 ϵ_{33}^S 来

确定, 其关系为

$$k_{15}^2 = -\frac{\epsilon_{33}^S}{\epsilon_{33}^T(1-k_p^2)}$$

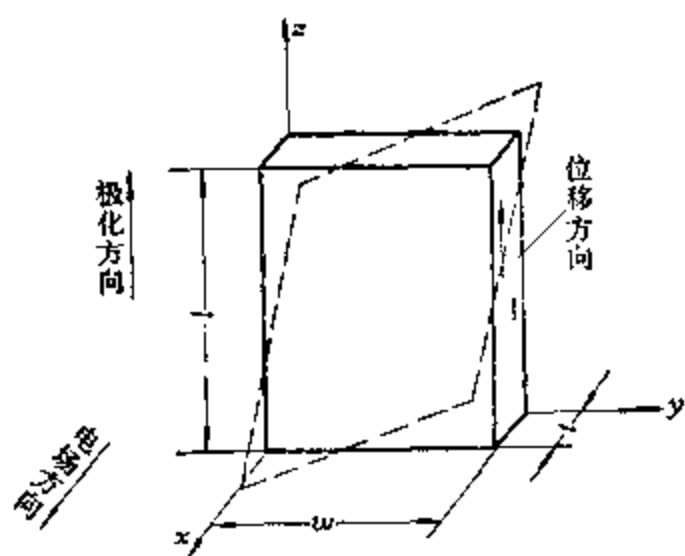
式中 ϵ_{33}^S 可用 Q 表在高频下测得。另一较好的方法是用导纳电桥测出振子的导纳特性, 然后用测出的高次泛音与基音频率之比, 查表得出 k_{15} 值。

厚度切变振动机电耦合系数

thickness shear vibration electromechanical coupling factor

厚度切变振动机电耦合系数 k_{15} 是反映压电振子作厚度切变振动时的机电耦合效应的一个参数。

如图所示, 设长度为 l 且沿着 z 方向, 宽度为 w , 厚度为 t 的薄板, 先在长度方向



厚度切变振动耦合振子坐标选取图

进行极化, 再在 lw 面上施加激励电场, 便可得到沿厚度方向传播的切变振动。厚度切变就是上表面相对于下表面沿着长度或宽度方向发生位移, 同时也可看成为所发生切变面的两条对角线作伸缩变形。在产生切变振动时, 除 xz 平面以外的其它方向上的形变均为零, 于是可确定 k_{15} 与串、并联谐振频率 f_s, f_p 之间的关系。

用传输法测厚度切变振动的 k_{15} 较困难, 一般可由测定自由介电常数 ϵ_{11}^T 和受夹介电常数 ϵ_{11}^S 来确定, 其关系为:

$$k_{15}^2 = 1 - \frac{\epsilon_{11}^S}{\epsilon_{11}^T}$$

另一较为准确的方法是用导纳电桥测出振子的导纳特性, 然后用测出的高次泛音与基音频率之比, 查表得出 k_{15} 值。

频率常数

frequency constant

压电体的频率常数 N 是谐振频率 f_r 与振子的长度 (或直径) h 的乘积。对长度伸缩振动模, h 是长度 l , 频率常数 $N_l = f_r l$; 对圆片径向伸缩振动模, h 是直径 d , 频率常数 $N_d = f_r d$ 。频率常数的单位是赫·米或千赫·毫米。

由于薄长片压电体的谐振频率 $f_r = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{1}{\rho S_{11}^E}}$ (式中 ρ 为材料密度), 所以 $N_l = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{\rho S_{11}^E}}$ 。因此, 压电体的谐振频率不仅与材料的性质有关, 而且也与外形尺寸有关; 而频率常数只与材料性质有关, 与压电体外形尺寸无关。

压电体由于其材料和振动模式的不同, 频率常数也有差异。如对同一种材料, 薄圆片径向伸缩振动频率常数 N_d 与长条片横向伸缩振动频率常数 N_l 之间的关系为

$$N_l \approx 0.733 N_d$$

频率常数是确定压电振子尺寸的重要参数。

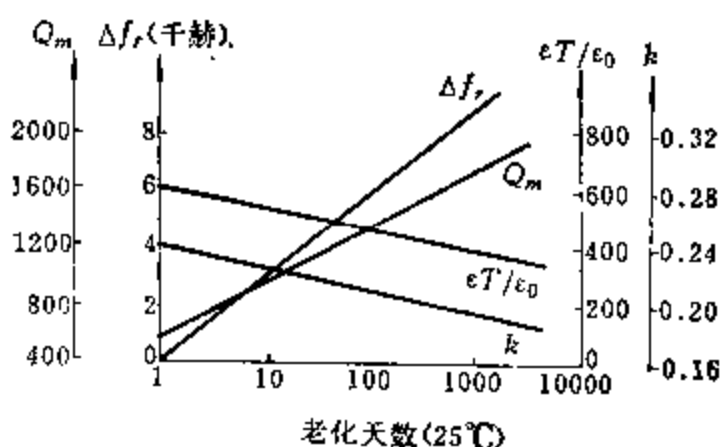
时间稳定性

time stability

时间稳定性是指极化后压电材料的性能随时间而变化的特性。用以衡量压电材料“时间老化”的大小, 时间稳定性大表示压电材料的性能随时间老化小。介电常数、介质损耗、压电常数、机电耦合系数和弹性柔顺常数都随时间而变小; 频率常数和机械品质因数则随时间而变大。这些物理参数的变化基本上与时间的对数值成线性关系 (见图)。这种随时间的不可逆变化的特性称为“时间老化”, 可用下式表示:

$$\frac{Y(t) - Y(t_1)}{Y(t_1)} = A \lg \frac{t}{t_1}$$

式中, Y 表示材料的参数; $Y(t_1)$ 为极化后经过时间 t_1 (如一天) 测得的参数值; $Y(t)$ 为极化后经过时间 t (如一百天等) 测得的参数值; A 表示图线的斜率, 它是一个常数 ($A > 0$ 表示参数随时间增大, $A < 0$ 表示参数随时间变小), A 通常称为“十倍时间的老化率”。



典型的压电陶瓷性能随时间的变化

温度稳定性

temperature stability

温度稳定性是指压电材料的性能随温度变化的特性。不同材料的各种性能随温度变化没有一个共同的规律, 因此只表征材料主要参数的变化关系。通常用“正温最大相对频移”和“负温最大相对频移”的方法来表示压电材料谐振频率随温度的变化特性, 其关系为:

$$\text{正温最大相对频移} = -\frac{\Delta f_r(\text{正温最大})}{f_r(25)}$$

$$\text{负温最大相对频移} = -\frac{\Delta f_r(\text{负温最大})}{f_r(25)}$$

式中 $f_r(25)$ 表示在常温 (通常指 25°C) 测得的频率值, $\Delta f_r(\text{正温最大})$ 表示正温范围内 (如 25~85°C) 相对于 $f_r(25)$ 的频率最大变化值, $\Delta f_r(\text{负温最大})$ 表示负温范围内 (如 -55~25°C) 相对于 $f_r(25)$ 的频率最大变化值。

压电材料其它参数的温度稳定性, 也可用上述方法表示。

另外, 还有一种用谐振频率温度系数来

表示材料温度稳定性的方法。谐振频率温度系数是指每变化 1°C 时谐振频率的相对变化值。这种方法对线性变化的材料是合适的, 但对非线性变化的材料是不合理的。由于压电陶瓷的温度特性基本上都属非线性变化, 因此, 一般均不用后一种方法来表示。

绝缘强度

dielectric strength

绝缘强度或称介电强度, 指材料单位厚度被电压击穿而失去绝缘性能时, 所需的电压数值。

测定材料的绝缘强度, 可根据不同的用途分别在直流电压、交流电压、脉冲电压下进行。

装置瓷的绝缘强度是在直流高压下测定的。

抗弯强度

bending strength

抗弯强度是指材料受到弯曲力作用而破坏的最大应力。

装置瓷机械强度的高低, 是以静态抗弯强度来表示的。

导热系数

coefficient of thermal conductivity

它表示当材料厚度为 1 厘米, 面积为 1 平方厘米, 两面的温度差为 1 度, 于 1 秒钟内通过此材料层所能传递的热量 (卡)。

导热系数用卡/厘米·秒·°C 表示。

装置瓷的导热系数越大, 散热能力越强。因此, 对于用在大功率和要求散热场合下的绝缘结构瓷件, 应选用导热系数较大的瓷料。

线膨胀系数

coefficient of linear thermal expansion

线膨胀系数是指在一定温度范围内, 温度每改变 1 度时, 材料线尺寸的相对变化值, 即

$$\alpha = \frac{l_t - l_0}{l_0} \frac{1}{t - t_0}$$

式中 l_0 为材料在最初温度 t_0 时的长度; l_t 为加热至温度 t 时材料的长度。

线膨胀系数是装置瓷的主要性能指标之一。当瓷件需要与金属封接或被釉时,应特别注意彼此的线膨胀系数要接近,否则对产品质量影响较大。

振动模式

vibration modes

压电材料的机械能和电能的相互转换,是通过某一尺寸和形状的振子,在某特定(按所需方向极化、激励和设置电极等)条件下产生振动来完成的。振子的振动方式,通常称为振动模式。压电陶瓷的振动模式,按极化方向与电场方向间的关系,一般可分伸缩振动、切变振动、弯曲振动三种类型。

1. 极化方向(\vec{P})与电场方向(\vec{E})平行时,产生伸缩振动。其振动方向与波传播方向是一致的,属于纵波。伸缩振动又分横向伸缩、纵向伸缩、径向伸缩和厚度伸缩等几种。

2. 极化方向(\vec{P})与电场方向(\vec{E})垂直时,产生切变振动。其振动方向和波传播方向是垂直的,属于横波。切变振动又分厚度切变和面切变两种。

3. 对于具有两对以上激励电极的振子,极化方向(\vec{P})与电场方向(\vec{E})平行但两者施加的方式方法不同时,便产生弯曲振动。其振动方向与波传播方向也是垂直的,属横波。弯曲振动一般可分为厚度弯曲和横向弯曲两种。

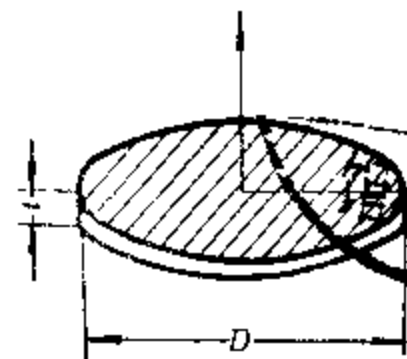
径向伸缩振动模

radial extension vibration mode

薄圆片压电陶瓷振子,其极化方向与厚度方向平行,并与电极相垂直,在外加交变电场作用下,薄圆片产生沿半径方向的伸缩振动(见图),这种振动方式称为径向伸缩振动模。其振动和波传播方向都与半径方向平行,片的中心振幅为零,基波时圆片边缘

振幅最大。

为了抑制不需要的其它振动模对本振动模的影响,圆片直径(D)与厚度(t)的关系最好是 $D \geq 10t$ 。径向振子一般适用的频率范围为200千赫~1兆赫,相对带宽在1.5~15%之间。



径向伸缩振动的薄圆片

环电极径向伸缩振动模

radial extension vibration mode of ring electrode

薄圆片全电极径向振子,去除当中的部分电极留下圆环电极(单面或双面),就是环电极振子。这种振子的振动方式称为环电极径向伸缩振动模。它的形状和频率特性见图1和图2。采用环电极结构的振子,其基波振幅受到很大抑制,但泛音频率却激发得较为充分。一次泛音和二次泛音分别约为基音频率的2.6倍和3.8倍。

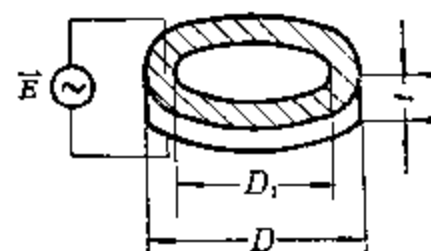


图1 环电极振子几何形状

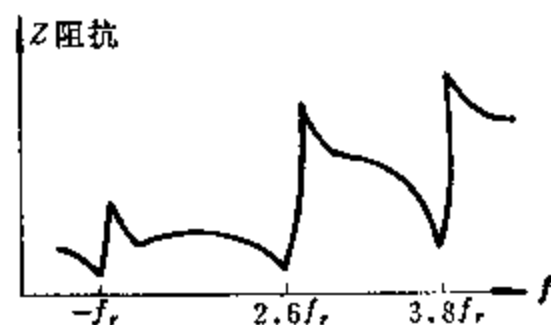


图2 环电极振子的频率响应

双面环电极同单面环电极相比,一般泛音响应较好,带宽较大,频率常数较高。当

$\frac{D_1}{D} = 0.3 \sim 0.4$ 时, 对应的二次泛音有最佳响应; 当 $\frac{D_1}{D} = 0.55 \sim 0.65$ 时, 对应的一次泛音有最佳响应; 而当 $\frac{D_1}{D} > 0.8$ 时, 则响应显著恶化。

环电极的适用频率范围是: 一次泛音为 1~3 兆赫, 二次泛音为 3~6 兆赫。它们的相对带宽一般在 0.3~3% 之间。

长度伸缩振动模

length extension vibration mode

薄长条压电陶瓷振子, 其极化方向与厚度方向平行, 并与电极面相垂直, 在外加交变电场作用下, 薄长条产生沿长度方向的伸缩振动, 这种振动方式称为横向长度伸缩振动模 (图 1)。其振动和波传播方向都与长度方向平行。对基波而言, 片的中心振幅为零, 两端振幅最大。其尺寸关系为 $l \geq 3.5w$, $w \geq 5t$ (l 、 w 、 t 分别为压电振子的长度、宽度和厚度)。

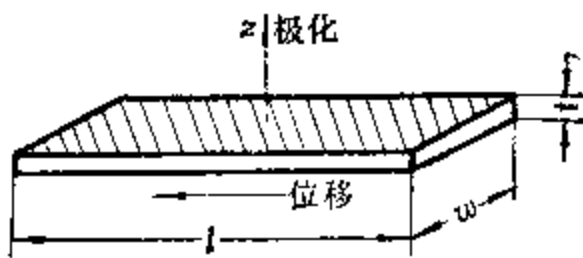


图1 横向长度伸缩振动模

这种振子适用频率范围一般为 50~200 千赫, 相对带宽在 0.5~5% 之间。

另外, 还有一种长度伸缩振子, 其极化方向与长度方向平行, 电极设置在长度的两个端面上。在外加交变电场作用下, 长条振子也按长度方向作伸缩振动, 这种振动方式称为纵向长度伸缩振动模 (图 2), 其振动

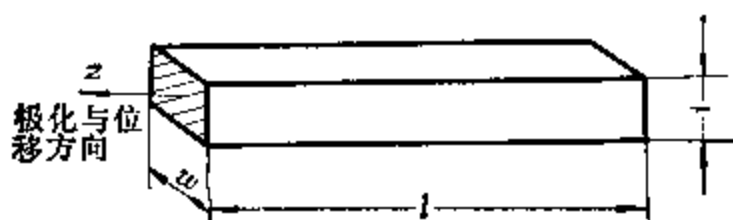


图2 纵向长度伸缩振动模

和波的传播方向均与长度平行。

纵向长度伸缩振动模

longitudinal length extension vibration mode

见“长度伸缩振动模”。

横向长度伸缩振动模

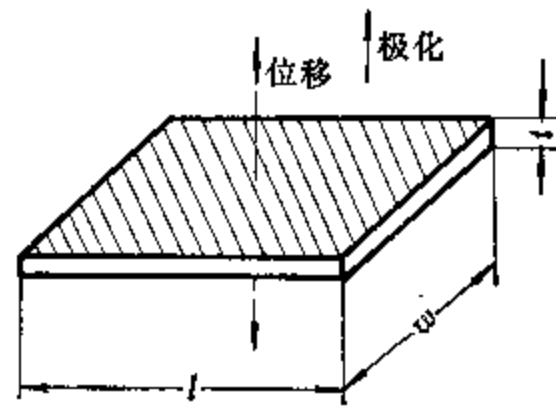
transverse length extension vibration mode

见“长度伸缩振动模”。

厚度伸缩振动模

thickness extension vibration mode

这种振动模的振子, 其极化和激励方法均与径向振子相同, 它仅利用沿振子厚度方向的振动, 这种模式称为厚度伸缩振动模 (见图)。它的振动方向和波传播方向皆与电极面相垂直。



厚度伸缩振动

为了抑制径向伸缩振动的干扰, 振子的直径或边长应为厚度的 5~10 倍。

基波厚度振动适用频率范围为 3~30 兆赫, 相对带宽在 1%~10% 之间。

厚度弯曲振动模

thickness-flexure vibration mode

将两片长条振子重叠粘合在一起, 电场 (\vec{E}) 方向与其中一片的极化 (\vec{P}) 方向相反, 这样便可得到当一片处于伸长 (或缩短) 时, 另一片则处于缩短 (或伸长) 的复合形变, 这种模式称为长条厚度弯曲振动模 (图 1)。振子的振动沿厚度 (z) 方向, 波的传播沿长度 (x) 方向。离振子两端 $0.224l$ 处 (节点)

振幅为零，长条的两端和中心振幅最大。

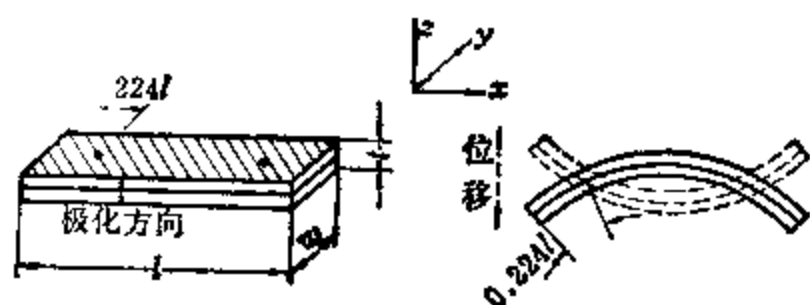


图1 厚度弯曲振动的长条叠片

尺寸关系一般为 $l = (6 \sim 10)w$, $w \geq 3.5t$ 。

这种振子适用频率范围为 300 赫~20 千赫，相对带宽约在 0.25~3% 之间。

此外，还有一种鼓形厚度弯曲振子，原理同上。其适用频率范围为 2~20 千赫，相对带宽约在 0.8~8% 之间（图2）。

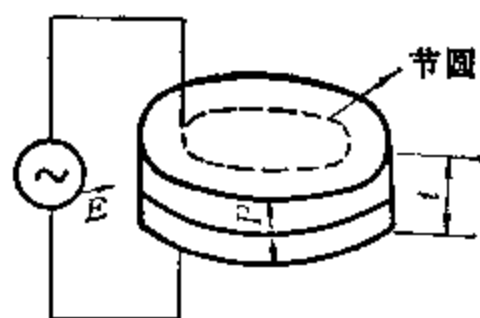


图2 厚度弯曲振动的圆片叠片

宽度弯曲振动模

width-flexure vibration mode

将一长条压电瓷片沿长度方向的中线把电极分割成相互绝缘的两部分，并令电场(\vec{E})方向与其中一部分的极化(\vec{P})方向相反，这样，可使得分割电极的一边处于伸长（或缩短）时，另一边则处于缩短（或伸长）。这种沿宽度方向的复合形变模式称为长条型宽度弯曲或称棱边双弯曲振动模（图1）。该振子的振动沿宽度(w)方向，波的传播沿长度(l)方向。离振子两端 $0.224l$ 处(节点)振幅为零，长条的两端和中心振幅最大。

此外，开槽圆环形振子在原理和性能上与长条分割电极振子相类似，因此也属于宽度弯曲振动的类型（图2）。

长条宽度弯曲振子的适用频率范围为20

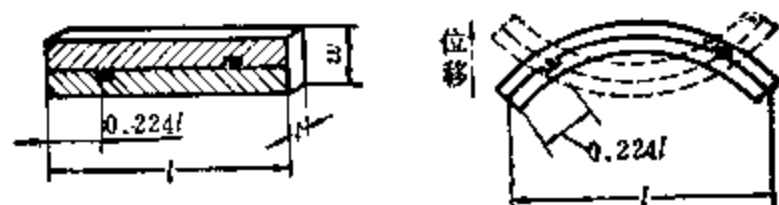


图1 长条的宽度弯曲振动

尺寸关系一般为 $l \geq 3.5w$, $w = (4 \sim 10)t$ 。

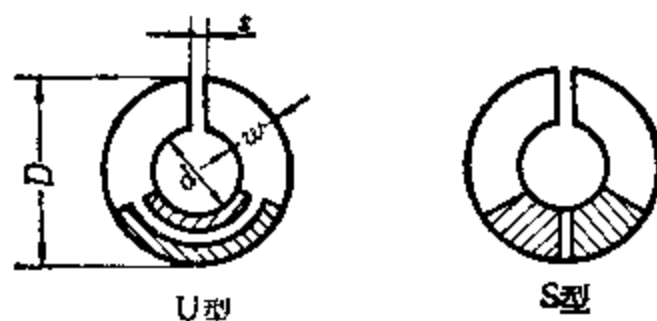


图2 开槽圆环形振子

~60千赫，开槽圆环振子为 5~70 千赫，常用振子的相对带宽约在 0.4~3% 之间。

鼓形厚度弯曲振子

drum thickness-flexure vibrator

见“厚度弯曲振动模”。

开槽环形弯曲振子

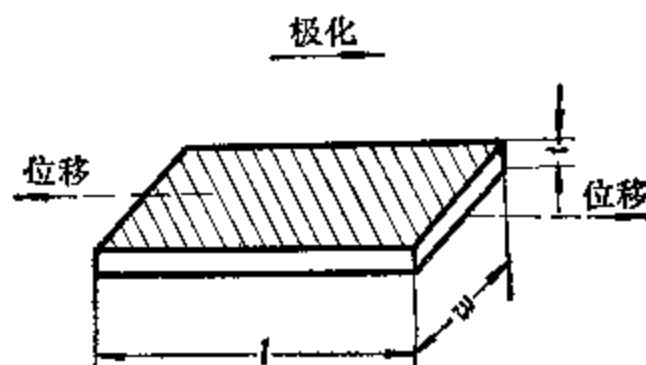
split-ring flexure vibrator

见“宽度弯曲振动模”。

厚度切变振动模

thickness-shear vibration mode

薄片压电陶瓷振子的极化(\vec{P})方向与激励电场(\vec{E})的方向相垂直时，在外加交变电场作用下，薄片产生沿厚度方向传播的切变振动，这种振动模式称为厚度切变振动模（见图）。振子的振动方向与极化方向平行，波的传播方向则与外加电场方向平行。



厚度切变振动

当用在高频,且振子尺寸 $l \gg w \gg t$ 时,其适用频率范围为 1~6 兆赫,相对带宽可达 15~30%。

能阱振动模

energy-trap type vibration mode

能阱振动模实质上是一种厚度振动。它的电极面积远小于瓷片面积(图1),若适

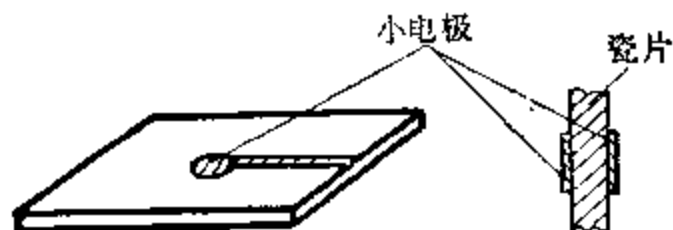


图1 能阱模振子示意图

当控制电极面积及其质量负荷就可产生“能阱”现象。所谓“能阱”是指振子振动能量绝大部分被局限在点电极之下的介质中。机械振动的振幅随着至电极距离的增加,而呈指数式衰减,因而几乎没有边界的影响(图2)。若把几个振子排列在同一块压电陶瓷

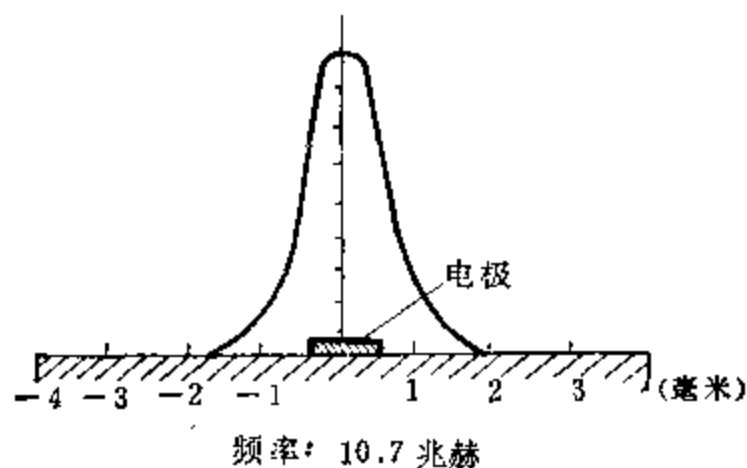


图2 能阱模振子能量封闭形式示例

片上,彼此之间保持一定的距离使其互不干扰,则它们可当作互相独立的振子使用(图3)。对于每一个点电极区域则形成一个独



图3 多电极型

立的声振动系统,其中振动和波的传播均沿厚度方向。此外,若将点电极分割,又可得到“多重模”振子(图4)。它的作用相当于一级Γ型滤波器,实用上颇有价值。



图4 分割电极

能阱基波振子常用在 3~40 兆赫的频率范围,相对带宽约为 4~10%。

此外,为得到更高的频率响应,可采用能阱振子的泛音振动。

采用能阱模泛音振动的振子的工作频率可达 120 兆赫,相对带宽约为 0.5~1%。

二、电子陶瓷

电子陶瓷

electronic ceramics

电子陶瓷或称电子工业用陶瓷，它在化学成分、微观结构和机电性能上，均与一般的电力用陶瓷有着本质的区别。这些区别是电子工业对电子陶瓷所提出的一系列特殊技术要求而形成的，其中最重要的是须具有高的机械强度，耐高温高湿，抗辐射，介质常数在很宽的范围内变化，介质损耗角正切值小，电容量温度系数可以调整（或电容量变化率可调整），抗电强度和绝缘电阻值高，以及老化性能优异等。

电子陶瓷按特性可分为高频和超高频绝缘陶瓷、高频高介陶瓷、铁电和反铁电陶瓷、压电陶瓷、半导体陶瓷、光电陶瓷、电阻陶瓷等。按应用范围可分为固定用陶瓷、电真空陶瓷、电容器陶瓷和电阻陶瓷。按微观结构可分多晶、单晶、多晶与玻璃相、单晶与玻璃相（无玻璃相陶瓷属于固相烧结，有玻璃相陶瓷属于液相烧结）。

利用陶瓷材料的高频或超高频和低频电气物理特性可制作各种不同形状的固定零件、陶瓷电容器、电真空陶瓷零件、碳膜电阻基体等等，它们在通信、广播、电视、雷达、仪器仪表等电子设备中是不可缺少的组成部分；另外，随着激光、计算、集成、光学等新技术的发展，电子陶瓷的用途更日益扩大。

电子陶瓷材料的发展，同物理化学、应用物理学、硅酸盐物理化学、固体物理学、光学、电学、声学、无线电电子学等的发展密切相关，它们相互促进，从而在电子技术的飞跃发展中，使电子陶瓷也相应地取得了很大进展。

装置瓷

ceramic for mounting purposes

用于制造电子元件、部件和电路中各种基体、结构件、绝缘零件等（如各种线圈骨架、绝缘子、高频瓷轴、半导体器件和集成电路基片、电子管绝缘结构零件等）的陶瓷，通称装置瓷。

这一类陶瓷材料，主要有滑石瓷、氧化铝瓷、镁橄榄石瓷、刚玉-莫来石瓷、氧化铍瓷等，其主要特点是有较高的绝缘电阻，高的机械强度，以及低的介质损耗角正切值。其中，氧化铍瓷更具有优异的导热系数。此外，还有一些具有特殊性能的装置瓷，如氮化硼瓷，透明陶瓷以及损耗角正切值低的硅灰石瓷、无收缩率的锂辉石瓷、热稳定性好的锆英石瓷等。

电真空瓷

ceramics for vacuum tubes

用于制作电真空器件的密封和绝缘结构零件的陶瓷，称为电真空瓷。属于这一类陶瓷材料的有氧化铝瓷、氧化铍瓷、镁橄榄石瓷和氧化硼瓷等。

电真空瓷必须具备下列几种特性：真空气密性好，高温下蒸气压低，低的介质损耗角正切值，小的介电常数，高的绝缘强度和机械强度，高的导热系数，适当的线膨胀系数，热稳定性好和化学稳定性好，以及瓷件尺寸精度高等。

陶瓷原料

ceramic raw materials

陶瓷原料是指用来制造陶瓷材料的各种天然矿物原料以及各种化工原料。矿物原料，主要是高岭土、石英、方解石、菱镁矿、滑

石等；化工原料，主要是氧化铝(Al_2O_3)、氧化镁(MgO)、氧化铍(BeO)、二氧化锆(ZrO_2)、碳酸钡(BaCO_3)、氮化硼(BN)、氮化硅(Si_3N_4)等。

陶瓷原料的成分与纯度，对所配制瓷料的性能有很大影响。用天然矿物原料配制瓷料，应选用杂质含量较低的原料。

高岭土

kaolin

高岭土是浅灰、浅黄或白色的质地细而疏松的粘土，其特征是化学成分纯、耐火性能好。它的主要矿物成分是高岭石，其化学式为 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 。

高岭土是制造装置瓷、电容器瓷和釉料的原料。在瓷料中加入高岭土，可以改善瓷件的成型性能，降低烧结温度和提高釉浆的悬浮能力。

膨润土

bentonite

膨润土是一种具有可塑性的矿物原料，与粘土相似。由于可塑性好，常用于含非可塑性原料多的瓷料中。

膨润土的主要成分是微晶高岭石($\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)，因其内含有较多的碱金属氧化物，用量一般较少；否则，将使产品的电性能降低，尺寸难于控制。

膨润土的颜色随所含的杂质不同而异，有白色、浅黄和棕色等。

滑石

talc

滑石是天然出产的含水硅酸镁，分子式是 $3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ，其结构有片状和粒状两种。滑石的特性是硬度低，破碎后多呈鳞片状，摸上去有滑腻的感觉。

滑石是滑石瓷、镁橄榄石瓷的主要原料，也可用来配制釉料。配制瓷料应选择杂质(如氧化铁、氧化铝等)含量少的滑石。滑石经高温煅烧后使用，可以减少片状结构对产

品性能的影响。

石英

quartz

石英为天然矿物，是丰富的原料。其成分主要是二氧化硅(SiO_2)；纯石英呈白色或无色，含铁量较高的石英呈淡黄色，比重为 2.56。

加热时，石英的体积随晶形转变也发生相应的变化。因此，陶瓷材料中不宜含有大量的游离石英，否则热稳定性和机械强度变差，会引起产品开裂。电子陶瓷工业中采用的石英成分应比较纯。一般说来，二氧化硅的含量应大于 98%，而铁的含量应低于 0.5%。

滑石瓷

steatite ceramics

滑石瓷是早期出现的一种高频绝缘陶瓷。它是由天然滑石、高岭土及碳酸钡等原料配制而成。其优点是具有高的机械强度，在 1 兆赫以下介质损耗角正切值小，以及易于制成各种复杂形状的制品。由于滑石原料来源较广而且价廉，至今仍是生产装置瓷零件的一种主要陶瓷材料。它的缺点是热稳定性差。

主要性能：比重 2.8~3 克/厘米³；介电常数(1 兆赫，20±5℃)6~7；介质损耗角正切值(1 兆赫，20±5℃)(1~7)×10⁻⁴；绝缘强度≥20 千伏/毫米；静态抗弯强度≥1400 公斤/厘米²；线膨胀系数(20~100℃)(6~7)×10⁻⁶/℃；比体积电阻(100±5℃)10¹³~10¹⁴ 欧姆·厘米。

滑石瓷主要用于制造各种类型的绝缘子、线圈骨架、高频瓷轴、波段开关、管座以及电阻基体等零件。此外，还用于制造各种小容量的高压电容器(如板形、罐形、鼓形等瓷介电容器)。

镁橄榄石瓷

forsterite ceramics

这种瓷的原料以滑石为主，加入适量的

氧化镁和少量的碳酸钡和高岭土，瓷体主晶相为硅酸镁($2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$)。该结晶在矿物学上称镁橄榄石。它的特点是线膨胀系数与金属钛甚相近，因此，能与金属钛良好地进行封接，缺点是热稳定性差。

镁橄榄石瓷用于制造电子管和半导体器件的绝缘零件，且广泛用于小型金属陶瓷管。此外，还用于制造电阻基体和陶瓷电容器。

主要性能：比重 $2.8 \sim 3$ 克/厘米³；静态抗弯强度 ≥ 1400 公斤/厘米²；介电常数（1兆赫， $20 \pm 5^\circ\text{C}$ ） ≤ 7.5 ；线膨胀系数 $\geq 11 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ；比体积电阻（ $100 \pm 5^\circ\text{C}$ ） $10^{13} \sim 10^{14}$ 欧姆·厘米；介质损耗角正切值（1兆赫， $20 \pm 5^\circ\text{C}$ ） $(1 \sim 3) \times 10^{-4}$ 。

钡长石瓷

celsian ceramics

它是以钡长石($\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)为基础的陶瓷材料，主要原料为高岭土和碳酸钡。钡长石瓷的特点，是具有较低的线膨胀系数和在高温下具有小的介质损耗角正切值。

主要性能：介质损耗角正切值（1兆赫， $300 \pm 5^\circ\text{C}$ ） $\leq 5 \times 10^{-4}$ ；比体积电阻（ $100 \pm 5^\circ\text{C}$ ） $10^{12} \sim 10^{13}$ 欧姆·厘米；绝缘强度 ≥ 20 千伏/毫米；线膨胀系数（ $70 \sim 100^\circ\text{C}$ ） $\leq 3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ；静态抗弯强度 $800 \sim 1000$ 公斤/厘米²。

由于这种瓷料的电性能优良，不仅可用于制作一般装置瓷零件，而且还可用以制造小容量的高压电容器和稳定性较高的电感线圈骨架等零件。

刚玉-莫来石瓷

corundum-mullite ceramics

这种陶瓷主要原料为高岭土、氧化铝和少量的膨润土，瓷体主晶相为刚玉($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)和莫来石($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)。它具有高的机械强度和绝缘强度，瓷料成型性能良好，但介质损耗角正切值比一般装置瓷大，可用于制造各种类型的高压绝缘子、高压开关、套管以及其他大型的装置瓷零件。

主要性能：比重 $3 \sim 3.2$ 克/厘米³；介质损耗角正切值（1兆赫， $20 \pm 5^\circ\text{C}$ ） $(14 \sim 18) \times 10^{-4}$ ；绝缘强度 $30 \sim 35$ 千伏/毫米；静态抗弯强度 $1600 \sim 2000$ 公斤/厘米²；比体积电阻（ $100 \pm 5^\circ\text{C}$ ） $10^{13} \sim 10^{14}$ 欧姆·厘米；线膨胀系数（ $20 \sim 100^\circ\text{C}$ ） $\approx 4 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。

低碱瓷

low-alkali ceramics

这种瓷的主要原料为高岭土、方解石、碳酸钡和石英等。

低碱瓷的特点是氧化钾与氧化钠的含量小于 $0.5 \sim 1.2\%$ ，瓷体表面平整光滑，适于作高温高稳定性碳膜电阻和金属膜电阻的基体，在直流负荷下老化后阻值变化较小，原料来源广，成本低。

低碱瓷的主要性能：介质损耗角正切值（1兆赫， $20 \pm 5^\circ\text{C}$ ） $\leq (25 \sim 40) \times 10^{-4}$ ；绝缘强度 ≥ 8 千伏/毫米；比体积电阻（ 300°C ） $\geq 1 \times 10^{10}$ 欧姆·厘米；静态抗弯强度 ≥ 800 公斤/厘米²。

氧化铝瓷

alumina ceramics

以氧化铝为主要原料，包括氧化铝含量为 $75 \sim 99.9\%$ 的各种陶瓷。这一类陶瓷具有特别高的机械强度和高温下优异的介电性能。氧化铝瓷的机电性能随着氧化铝含量增加和杂质减少而提高。在一定条件下，零件的机电性能与制造工艺方法的选择关系很大。一般多选用 $92 \sim 95\%$ 氧化铝瓷。含氧化铝 $99 \sim 99.9\%$ 的陶瓷，其机电性能优越，但制造工艺复杂，产品成本高，仅适用于性能要求高的产品上。

氧化铝瓷的制造工艺，除了传统工艺外，在成型方面可采用热压烧结、等静压等，薄的瓷件可采用轧膜和流延薄膜成型。根据含 Al_2O_3 量的大小，其烧成温度为 $1400 \sim 1800^\circ\text{C}$ ；采用特定的工艺可制造透明度较高的氧化铝瓷。这些陶瓷主要用于制作超高频、

大功率电真空器件绝缘结构零件, 厚膜, 薄膜和微波集成电路基片, 特种坩埚和热压模具等。

92~99.9%氧化铝瓷的主要性能: 比重 $3.65 \sim 3.9$ 克/厘米³, 静态抗弯强度 $3000 \sim 4000$ 公斤/厘米²; $20 \sim 500^\circ\text{C}$ 下线膨胀系数 $(6.5 \sim 8.5)10^{-6}/^\circ\text{C}$; 室温下 9.5 千兆赫下介质损耗角正切值 $(1 \sim 6)10^{-4}$; 室温下 9.5 千兆赫下介电常数 ≈ 10 ; 导热系数 $0.05 \sim 0.06$ 卡/厘米·秒· $^\circ\text{C}$; 绝缘强度 ≥ 30 千伏/毫米; 比体积电阻 $(100 \pm 5^\circ\text{C})10^{13} \sim 10^{14}$ 欧姆·厘米。

氧化铍瓷

beryllia ceramics

氧化铍(BeO)瓷的最大特点是导热系数高, 近似于金属铝, 又具有良好的绝缘性能。氧化铍瓷的导热性能受氧化铍(BeO)含量的影响较大, 如 95% 氧化铍瓷的导热性能只有 99% 氧化铍瓷的 80% 左右。

氧化铍瓷的主要原料是氧化铍粉末。另外, 为了降低烧成温度, 常加入适量的添加剂氧化镁(MgO)、氧化铝(Al_2O_3)、氧化钙(CaO)、二氧化硅(SiO_2)等。工艺流程与一般的电子陶瓷相同, 只是它的烧结温度较高, 通常在氢气炉或真空炉中进行烧结; 烧成气氛对致密烧结影响较大。为提高制品的致密度, 也可采用热压烧结。由于氧化铍粉末有毒, 在生产上需采取特殊的防护措施, 如抽风, 防尘和污水处理等设施。

氧化铍瓷是优良的高导热绝缘材料, 其电性能近似于氧化铝瓷。它用于制作晶体管的管壳、管座、散热片、功率较大的集成电路和微波集成电路基片、波导窗, 以及用于空间技术、原子能等方面。

95~99% 氧化铍瓷的主要性能:

导热系数 $0.4 \sim 0.5$ 卡/厘米·秒· $^\circ\text{C}$

介电常数(9.5 千兆赫) $6 \sim 7$

介质损耗角正切值(9.5 千兆赫)

$\approx 4 \times 10^{-4}$

绝缘强度($100 \sim 300^\circ\text{C}$)

$10 \sim 14$ 千伏/毫米

比体积电阻 $10^{13} \sim 10^{14}$ 欧姆·厘米

比重 ≈ 2.9 克/厘米³

静态抗弯强度 $1800 \sim 2000$ 公斤/厘米²

线膨胀系数(室温 $\sim 500^\circ\text{C}$)

$(5 \sim 8) \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$

氧化镁瓷

magnesia ceramics

原料为氧化镁(MgO)或菱镁矿、水镁石($\text{Mg}(\text{OH})_2$)、碱性碳酸镁等及少量添加剂。特点是高温高频下绝缘性能优良, 导热系数大。其主要性能:

比重 3.4 克/厘米³

线膨胀系数($40 \sim 800^\circ\text{C}$)

$(11 \times 13) \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$

导热系数 0.1 卡/厘米·秒· $^\circ\text{C}$

介电常数(1 兆周) ≈ 8

介质损耗角正切值(1 兆周)

$(2 \sim 4) \times 10^{-4}$

绝缘强度 10 千伏/毫米

静态抗弯强度 1000 公斤/厘米²

比体积电阻($20 \sim 500^\circ\text{C}$)

$10^{12} \sim 10^{14}$ 欧姆·厘米

氧化镁瓷对氧化铅, 碱金属的耐蚀性和高频绝缘特性均比氧化铝瓷好, 适于用作电子管绝缘结构材料、热电偶外套、坩埚、热压模具等。

氮化硼瓷

boron nitride ceramics

这是装置瓷中比较实用的一种非氧化物陶瓷。它有两种不同的结晶结构: 六方形结构的氮化硼瓷与石墨相似, 通常又称为“白石墨”, 润滑性能好, 硬度低(莫氏硬度为 2), 易于进行机械加工, 是较好的可切削介质; 立方结构氮化硼瓷的硬度高, 接近金刚石的硬度。电子工业中主要使用六方形结构氮化硼瓷, 其性能与成型时的加压方向

有关。

采取不同的工艺方法可制成纤维状、单晶体、多晶体、半透明或不透明等各种不同的制品。

氮化硼瓷的特点是比重小,热稳定性、化学稳定性好,导热系数高于氧化铝瓷,500°C以下低于氧化铍瓷,500°C以上则高于氧化铍瓷。因此,氮化硼瓷是理想的高温导热绝缘材料。它可用作功率较大的晶体管管座、管壳、散热片及微波输出窗。另外,还可在金属、稀有金属、化学、机械、原子能工业等方面使用,应用范围在日益扩大。

热压氮化硼瓷六方形结构的主要性能:

比重 2.0~2.2克/厘米³

硬度(莫氏) 2

静态抗弯强度 630公斤/厘米²

线膨胀系数(25~500°C)

垂直加压方向

$(0.19 \sim 0.03) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

平行加压方向

$(0.54 \sim 1.82) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

导热系数(60°C) ≈ 0.1 卡/厘米·秒·°C

比体积电阻(25°C) 10^{13} 欧姆·厘米

介电常数(1兆赫) ≈ 4.0

介质损耗角正切值(9.5千兆赫)
 $(1 \sim 5) \times 10^{-4}$

绝缘强度 >20千伏/毫米

氮化硅瓷

silicon nitride ceramics

氮化硅(SiN₄)瓷是一种耐高温绝缘材料,可采用热压和反应烧结工艺制造。

氮化硅瓷具有硬度大、化学稳定性和热稳定性好、耐热急变性优良、制品尺寸精度较高等优异性能。

它除用作高温绝缘材料,用于微电子技术中作二极管、场效应二极管、电容等器件外,还可制作坩埚、铸造模,以及用作导弹上的尾喷材料等。

氮化硅瓷的主要性能:

比重 2.6~3.0 克/厘米³

介电常数 ≈ 9.4

比体积电阻(20~400°C)

$10^{13} \sim 10^{14}$ 欧姆·厘米

静态抗弯强度

2500~6000公斤/厘米²

线膨胀系数 $\approx 2.5 \times 10^{-6} \sim 10^{-8}/^{\circ}\text{C}$

导热系数

0.012~0.04卡/厘米·秒·°C

抗压强度 1200公斤/厘米²

抗拉强度 1200~1400公斤/厘米²

弹性模量

$(1.7 \sim 2.2) \times 10^6$ 公斤/厘米²

硬度(RA) 80~85

四钛酸钡瓷

barium tetratitanate ceramics

四钛酸钡(BaTi₄O₉)瓷是一种新型微波介质材料。它采用碳酸钡与二氧化钛等原料,用热压或常规的烧结方法制备。这种瓷具有高介电常数和低损耗的特点,其介电常数比氧化铝瓷的高,且温度稳定性好,适于用作微波低频段的基片材料。它的主要性能:

介电常数(10千兆赫) ≈ 38

介电损耗角正切值(10千兆赫)
 $\approx 4 \times 10^{-4}$

电容温度系数 $(-50) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

静态抗弯强度 >950公斤/厘米²

导热系数 0.005卡/厘米·秒·°C

线膨胀系数 $9.4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

锆酸盐瓷

zirconate ceramics

这是一种新型微波材料,是利用具有正温度系数的锆酸锶(SrZrO₃)、锆酸钙(CaZrO₃)和具有负温度系数的钛酸锶(SrTiO₃)、钛酸钙(CaTiO₃)、锆酸钡(BaZrO₃)等的固溶体组合而成的陶瓷。

锆酸盐瓷的特点是,介电常数(4千兆

赫时为30~40)比氧化铝瓷的高,介质损耗角正切值较小(4~5千兆赫时小于 10×10^{-4}),烧成温度范围较宽,且通过改变组份可获得各种不同温度系数的瓷料。这类陶瓷适于用作微波频段的介质和微波基片等。

多孔陶瓷

porous ceramics

这是一种气孔率较大(体积比约为60%左右)的陶瓷介质材料。

多孔陶瓷的特点是比重小(0.8~1.8克/厘米³),损耗小和电性能(在较宽的温度范围内)稳定。

制造多孔陶瓷的常见材料有氧化铝(Al_2O_3)、氧化锌(ZnO)、氧化锆(ZrO_2)、氧化钍(ThO_2)、氧化铪(HfO_2)、氧化铈(CeO_2)等。

多孔陶瓷适于用作电子管支撑件及高温绝缘材料等。

透明陶瓷

transparent ceramics

透明陶瓷一般采用热压工艺,陶瓷坯件结晶微细,气孔少,可烧结成高致密且有透光性质的陶瓷,如透明氧化铝瓷在可见光范围的透光率可达90%以上。

这类陶瓷有氧化钇(Y_2O_3)、氧化镁(MgO)、氧化铝(Al_2O_3)等。

透明陶瓷可应用于导弹窗、高温炉窗、高温使用的光学装置。

蓝宝石

sapphire

蓝宝石($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Ti}^{+4} \text{Fe}^{+3}$)是 α 氧化铝单晶。纯的 α 氧化铝单晶是无色透明的。当含少量氧化钛时呈蓝色,叫蓝宝石;含少量氧化铬时呈红色,叫红宝石。天然蓝宝石很少,且体积小。人造蓝宝石是将掺进微量钛离子和铁离子的高纯氧化铝粉末压块,在单晶炉中用提拉法生长,可得到优质大单晶。

蓝宝石具有优异的绝缘、光学和声学等

性能。其主要性能为:

比重 3.99克/厘米³

硬度(莫氏) 9

比体积电阻(500°C)

10^{14} 欧姆·厘米

介电常数(500°C, 1兆赫~8.5千兆赫)

≈ 9.9

介质损耗角正切值(500°C, 1兆赫

~8.5千兆赫) $(1 \sim 6) \times 10^{-4}$

声速

纵波

$(11.35 \pm 0.1) \times 10^5$ 厘米/秒

横波

$(6.18 \pm 0.05) \times 10^5$ 厘米/秒

声衰减(10千兆赫)

纵波

11.0分贝/厘米

横波

5.94分贝/厘米

线膨胀系数(20~500°C)

$7.7 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$

导热系数

≈ 0.065 卡/厘米·秒·°C

绝缘强度(垂直于C轴) 47千伏/毫米

抗张强度

> 1400 公斤/厘米²

蓝宝石主要可用作微波输出窗、集成电路基片,精密电阻基体、电真空器件、隔离片、支架、声表面波器件等。

电容器陶瓷

capacitor ceramics

这类陶瓷是专供I型瓷介电容器作介质用的陶瓷。其特点是:介电常数大,能制造体积小、重量轻的瓷介电容器;介质损耗小,能减低在高频工作条件下的损耗发热;介电常数的温度系数范围宽广,按其所用材料可在 $(-5600 \sim +150) \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 之间调整。属于这类陶瓷的有金红石瓷(二氧化钛)、钛酸钙瓷、钛酸镁瓷、钛酸锆瓷等。

金红石瓷

rutile ceramic

它的主晶相为金红石型二氧化钛。为改善其制造的工艺性能和电性能,加入少量的粘土、二氧化锆、碳酸钡、萤石等。这种陶瓷的介电常数为80左右;电容量温度系数为 $-(750 \pm 100) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$;介质损耗角正切值为 $(2 \sim 6) \times 10^{-4}$;绝缘强度和电阻率较高。金红石瓷可用来制造温度补偿电容器、旁路电容器、隔直流电容器等,是目前制造瓷介电容器的主要瓷料之一。

钛酸钙瓷

calcium titanate ceramic

它的主晶相为钛酸钙(CaTiO_3),它由二氧化钛(TiO_2)和碳酸钙(CaCO_3)按等克分子比例在温度为 $1250 \sim 1320^{\circ}\text{C}$ 下合成为钛酸钙烧块。其中加入少量的矿化剂,可促使结晶细密,降低瓷料的烧成温度和扩展烧成温度范围,同时还能改善瓷料的电性能和提高稳定性。

这种陶瓷的特点是介电常数高,约为 $150 \sim 160$;介电常数的温度系数的绝对值较高,达 $-(1500 \sim 1600) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$;介质损耗较小,约为 $(2 \sim 3) \times 10^{-4}$ 。钛酸钙瓷是一种常用的电容器陶瓷,可用于制造对频率稳定性要求不高的回路电容器、高频旁路电容器和耦合电容器等。

钛镁系瓷

magnesium titanate system ceramics

这类陶瓷的主晶相为钛酸镁($2\text{MgO} \cdot \text{TiO}_2$, $\text{MgO} \cdot \text{TiO}_2$, $\text{MgO} \cdot 2\text{TiO}_2$ 等)。调整钛、镁的比例可以得到不同的介电常数的温度系数值。这类陶瓷介质损耗小,一般为 $(1 \sim 3) \times 10^{-4}$,但介电常数不大(一般在20左右)。为了提高介电常数,往往在这类瓷料中加入钛酸钙等材料,但介电常数的温度系数值会因此呈现出越来越大的负值。

钛锆系瓷

zirconium titanate system ceramics

这类陶瓷的主晶相为钛酸锆(ZrTiO_4),

其原料主要为二氧化钛和二氧化锆。瓷料中二氧化钛和二氧化锆比例的不同,陶瓷的介电常数和介电常数的温度系数值也不相同。介电常数在 $30 \sim 55$ 范围内变化时,其介电常数的温度系数值可在 $(+33 \sim -470) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 范围内任意调节。这类陶瓷是制造I型瓷介电容器的主要介质材料之一。

铁电陶瓷

ferroelectric ceramics

铁电陶瓷是具有自发极化性质的陶瓷材料。大部分I型瓷介电容器都是用钛酸钡(BaTiO_3)为主晶相的铁电陶瓷制造的。钛酸钡陶瓷是先用碳酸钡(BaCO_3)和二氧化钛(TiO_2)高温合成钛酸钡,再加入少量为改善工艺和电性能所需要的各种附加剂配制而成的。

铁电陶瓷具有特别高的介电常数(可达10000以上)。介电常数随温度呈非线性变化,其变化率视具体配方而不同。一般介电常数高的,变化率也大。此外,铁电陶瓷还具有电滞效应、压电效应和压敏效应等特性。

见“压电陶瓷”。

低温烧结陶瓷

low-temperature sintered ceramics

这类陶瓷是由陶瓷介质材料中加入适量的助熔剂和矿化剂烧结在远比一般陶瓷烧结温度低的温度(850°C 左右)下烧成的,故称为低温烧结陶瓷。由于它的烧结温度与一般电极(如银电极材料)的烧渗温度基本一致,因而可以一次烧成独石电容器。这类陶瓷品种繁多,配方视制作独石电容器的品种要求而不同。

目前低温烧结的瓷料基本上有三类:一类是 $\text{tg}\delta$ 较大,介电常数 ϵ 也较大的低频瓷料,如以铌镁酸铅 $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ 为主晶相另加适当的助熔剂(如玻璃)和矿化剂(Bi_2O_3)以及移峰剂(PbTiO_3)的低温烧结陶瓷材料。适量玻璃和 Bi_2O_3 的加入是为

了降低烧成温度。适量 PbTiO_3 的加入是为了把铌镁酸铅的居里点 (-12°C) 移到室温, 以使瓷料在室温附近有大的介电常数, 因为 PbTiO_3 的居里点为 $+500^\circ\text{C}$, 随着 PbTiO_3 掺入量的增加, 居里点向正温方向移动。

另一类是 $\text{tg}\delta$ 较小, 介电常数适中的高频低温烧结陶瓷, 属于这类材料是: $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{W}_{2/3})\text{O}_3$, $\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$, $\text{Bi}(\text{Ni}_{2/3}\text{Nb}_{1/3})\text{O}_3$ 等为主晶相并加适量的助熔剂在 $850\sim 900^\circ\text{C}$ 下烧结而成。

再一类是成瓷温度较高(如 BaTiO_3 等)加入较大量的玻璃体, 这类陶瓷类似玻璃釉介质材料。

镁-镧-钛系统陶瓷

magnesia-lanthana-titania system ceramics

这一类陶瓷材料可以作高温(155°C)陶瓷电容器, 是高频温度补偿陶瓷电容器的优异材料之一, 不但介电性能优良, 而且有特高的热稳定性。其特点是有高的介质常数, 较小的介质损耗角正切值, 高的绝缘电阻, 以及一系列不同的电容量温度系数。

$\text{MgO}-\text{La}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2$ 系统陶瓷介电性能: 介电常数为 $30\sim 40$, 介质损耗角正切值小于 4×10^{-6} , 电容量温度系数 $(-33\sim +120)\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。

$\text{CaO}-\text{MgO}-\text{La}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2$ 系统陶瓷介电常数 $40\sim 130$, 介质损耗角正切值 $(0.4\sim 3)\times 10^{-4}$, 电容量温度系数 $(-75\sim -750)\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。这些瓷料的介电强度一般是每毫米大于 15 千伏。

镁镧钛瓷或钙镁镧钛瓷属于固相烧结, 工艺特性优良, 主晶相为由偏钛酸镁 MgTiO_3 、二钛镧 ($\text{La}_2\text{O}_3\cdot 2\text{TiO}_2$) 和少量的二氧化钛 (TiO_2) 组成; 当电容量温度系数为 $(-75\sim -750)\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 时, 加入不同数量的钛酸钙 (CaTiO_3) 来调整, 因此主晶相成分为

$\text{MgTiO}_3-\text{La}_2\text{O}_3\cdot 2\text{TiO}_2-\text{TiO}_2$ (少量) 和 $\text{CaTiO}_3-\text{La}_2\text{O}_3\cdot 2\text{TiO}_2-\text{MgTiO}_3$ 。

钛酸钡-二钛镧-钛酸锶系统陶瓷

barium titanate-lanthanum titanate-strontium titanate system ceramics

这个系统的陶瓷材料, 主要是以钛酸钡 (BaTiO_3) 为基, 加入一定数量的二钛镧 ($\text{La}_2\text{O}_3\cdot 2\text{TiO}_2$) 和钛酸锶 (SrTiO_3), 可以获得介电常数高、介质损耗角正切值小和一系列不同电容量温度系数的陶瓷材料。当介电常数为 $250\sim 700$ 时, 1 兆赫以上频率介质损耗角正切值为 6×10^{-4} , 电容量温度系数为 $(-2200\sim -5600)\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。当介电常数大于 1500 或 2500 时, 0.3 兆赫以上频率介质损耗角正切值为 $(6\sim 8)\times 10^{-4}$, $20\sim +85^\circ\text{C}$ 电容量变化率为 $30\sim 40\%$, 可以作为高频高介温度补偿电容器陶瓷材料。

这一类陶瓷工艺性能好, 产品电性能稳定性高, 特别是烧结温度范围宽, 在较宽的温度范围内焙烧, 都可以获得优良的电性能陶瓷制品。其主晶相为钛酸钡和一定数量的二钛镧、钛酸锶, 基本上属于固相烧结的陶瓷材料。

半导体陶瓷

semiconductive ceramics

这类陶瓷具有半导体性能和高介电常数特性, 常用来制造热敏电阻、非线性压敏电阻、低压大容量电容器和热电元件等。这类瓷料有钛酸钡瓷、氧化锌瓷、硫化镉瓷、氧化钛-氧化铅-氧化镧瓷、氧化钨-氧化镉-氧化铅瓷等。

半导体陶瓷和一般陶瓷在制造工艺方面的主要差别是要进行一次半导体化工艺。一种方法是用不等价离子取代部分主晶相的离子, 从而产生半导体性。另一种方法是用还原气氛使瓷料还原, 产生半导体性。

用半导体陶瓷制造的元件和器件, 工艺简单, 成本较低, 低温稳定性较好。

压电陶瓷

piezoelectric ceramics

具有压电效应的陶瓷,称压电陶瓷。

它通常由几种氧化物或碳酸盐在烧结过程中发生固相反应而形成,其制造工艺与普通的电子陶瓷相似。烧结出来的陶瓷体是多晶体,其自发极化是紊乱取向的,主要成分是铁电体,因此称铁电陶瓷,没有压电性能。对这样的陶瓷体施加强直流电场进行极化处理,原来混乱取向的自发极化就沿电场方向择优取向。去除电场后,陶瓷体仍保留着一定的总体剩余极化,遂使陶瓷体有了压电性能。

与压电单晶材料相比,压电陶瓷的特点是制造容易,可做成各种形状;可任意选择极化轴方向;易于改变瓷料的组分而得到具有各种性能的瓷料;成本低,适于大量生产。但由于是多晶材料,所以使用频率受到限制。

目前最常用的压电陶瓷有钛酸钡、钛酸铅、锆钛酸铅、三元系压电陶瓷、透明铁电陶瓷以及铌酸盐系陶瓷等。

压电陶瓷主要用于制造超声、水声、电声换能器,陶瓷滤波器,陶瓷变压器以及点火、引爆装置。此外,还可用压电陶瓷制作表面波器件、电光器件和热释电探测器等。

含铅陶瓷在工艺操作过程中须注意铅中毒的防护问题。

反铁电陶瓷

anti-ferroelectric ceramics

反铁电陶瓷是以反铁电材料为主要原料,用电子陶瓷工艺制成的多晶陶瓷体。目前研究得最多的是掺镧和掺铌的锆酸铅-锡酸铅-钛酸铅系 $[\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Sn}, \text{Ti})\text{O}_3]$ 反铁电陶瓷。

反铁电陶瓷可用于储能和换能等方面。

见“反铁电晶体”。

透明铁电陶瓷

transparent ferroelectric ceramics

透明铁电陶瓷通常指掺镧的锆钛酸铅,还有掺铌的锆钛酸铅、掺镧的钡钛酸铅,它们都具有电光效应。在铁电陶瓷中,电畴状态的变化伴随着光学性质的改变,通过外加电场对透明陶瓷电畴状态的控制,可有电控双折射(细晶陶瓷)和电控光散射(粗晶陶瓷)、电诱相变、电控表面形变等特性。

透明铁电陶瓷与电光晶体材料相比,其优点是制造工艺简单,样品尺寸可以做得比较大,加工时无需定向切割,成本低;缺点是透光度较低,光学、声学损耗较大,使用频率较低。

它有可能用作光调制器、光电显示器、光信息存储器、光阀、光电传感器、映象存储和显示器、激光防护镜以及热释电探测器等器件的材料。

钛酸钡陶瓷

barium titanate ceramics

钛酸钡陶瓷是以碳酸钡和二氧化钛为主要原料,预先合成后再在高温下烧结而成。它是一种具有典型钙钛矿型结构的铁电陶瓷。它的居里点约为 120°C ,密度约为 5.7克/厘米^3 ,介电常数约为1700,介质损耗角正切值约为1%,经过极化的钛酸钡陶瓷其机电耦合系数 K_p 约为0.36,机械品质因素 Q_M 约为300,压电常数 d_{31} 和 d_{33} 分别约为 -79×10^{-12} 和 191×10^{-12} 库仑/牛顿, g_{31} 和 g_{33} 分别为 -4.7×10^{-8} 和 11.4×10^{-8} 伏·米/牛顿。

钛酸钡陶瓷的工作温度范围窄(低于 80°C),温度稳定性差,但通过掺入少量杂质可适当改善性能。

钛酸钡压电陶瓷可用于拾音器、超声换能器和水声换能器等。但这种材料的压电性能和稳定性比锆钛酸铅等压电陶瓷材料差,已渐被其他压电陶瓷材料所取代。

钛酸铅陶瓷

lead titanate ceramics

钛酸铅陶瓷是由四氧化三铅(或氧化铅)

和二氧化钛以及少量添加物预先合成,再在高温下烧结而成。纯钛酸铅烧结是困难的,工艺掌握不好,易于粉化。在 PbTiO_3 成分中添加少量杂质能获得致密的 PbTiO_3 陶瓷。它的极化处理要在较高温度下施加强电场。

PbTiO_3 陶瓷具有钙钛矿型结构,其居里点约为 490°C ,密度约为 7.87克/厘米^3 ,介电常数 ϵ 约为 210。机械品质因数 Q_m 达 1300,机电耦合系数 k_p 约为 0.1, k_{33} 和 k_{15} 分别达 0.4 和 0.43。这种瓷料的热释电效应较强。

PbTiO_3 陶瓷的特点是居里点高,介电常数低,稳定性好,机械强度较高。它适用于制造高频陶瓷滤波器、换能器和热释电探测器等。

二元系陶瓷

binary system ceramics

二元系陶瓷是由两种化学通式为 ABO_3 型结构的化合物所形成的固溶体(其中 A 代表二价的正离子 Pb^{+2} 、 Ba^{+2} 、 Mg^{+2} 、 Ca^{+2} 、 Sr^{+2} 等,或一价正离子 K^{+1} 、 Na^{+1} 等, B 代表四价的正离子 Zr^{+4} 、 Ti^{+4} 或五价正离子 Nb^{+5} 等),最常见的二元系陶瓷如 NaNbO_3 - KNbO_3 、 $x\text{PbZrO}_3$ -($1-x$) PbTiO_3 等。当两种 ABO_3 型结构的化合物克分子比为某一比值时,这时具有最大的压电性能。通过调节两种 ABO_3 型结构的克分子比,以及用取代元素和添加物的改性方法,可以获得各种不同性能和不同用途的材料。

二元系陶瓷的特点,如 PZT 陶瓷具有矫顽场高、介质损耗小的特点,但从兼有高 k_p 、高 Q_m 性能来看,它是不如三元系陶瓷的。

锆钛酸铅陶瓷

lead zirconat-titanate ceramics

锆钛酸铅陶瓷主要成分是 PbTiO_3 - PbZrO_3 固溶体。它是以 Pb_3O_4 (或 PbO)、 TiO_2 、 ZrO_2 和少量添加物的混合物预先合成后再

在高温下烧结而成。它具有钙钛矿型结构,当锆钛原子比为 53 比 47 左右时,具有大的压电性能。在锆钛酸铅陶瓷中,通过改变锆钛比和用置换元素或添加物改性的方法,可以调节和提高其压电性能。这种陶瓷的居里点因配方而变化,常在 $150\sim 370^\circ\text{C}$ 范围内;密度约为 7.6克/厘米^3 ;介电常数 ϵ 为 $350\sim 3500$;介质损耗角正切值为 $0.40\sim 2.0\%$;频率常数为 $1400\sim 2800\text{赫}\cdot\text{米}$;机电耦合系数 k_p 为 $0.2\sim 0.7$;压电常数 g_{31} 为 $-14.5\times 10^{-3}\text{伏}\cdot\text{米/牛顿}$, d_{31} 为 $-93.5\times 10^{-12}\text{库仑/牛顿}$, g_{33} 为 $34.5\times 10^{-3}\text{伏}\cdot\text{米/牛顿}$, d_{33} 为 $223\times 10^{-12}\text{库仑/牛顿}$ 。

它与 BaTiO_3 压电陶瓷相比,其特点是压电性能优良,居里点高,稳定性好,矫顽场高,改变其组分容易得到各种不同性能的材料。在烧结过程中要防止瓷料失铅。

这种压电陶瓷是目前广泛使用的一种材料。它主要用于超声换能器、水声换能器、陶瓷滤波器、陶瓷变压器、受话器、扬声器、气体点火装置等,还可用于表面波器件和热释电探测器等方面。

三元系陶瓷

ternary system ceramics

三元系陶瓷通常是在具有钙钛矿型结构的锆钛酸铅(PbZrO_3 - PbTiO_3)二元系中再增加第三种化学通式为 ABO_3 型化合物而形成的三元系固溶体。所增加的第三种成分,它们的共同特点是在掺入 PbZrO_3 - PbTiO_3 之中形成固溶体后不改变整个晶格的钙钛矿型结构。

三元系陶瓷与锆钛酸铅陶瓷相比,其特点是它的烧结性能良好,不但烧成温度范围宽,而且 PbO 的挥发也少。因此,工艺重现性好,容易获得气孔率少的致密陶瓷体,从而具有高的机械强度,以及在某些性能方面比二元系陶瓷有显著的优异性。

三元系陶瓷发展相当迅速,品种可达几

十种。每种三元系统陶瓷材料各具有某些突出的优异特性（见下表）。

按特性区分的典型三元系统陶瓷

高机电耦合系数 (k_p) 压电陶瓷:

铌铈-锆-钛酸铅 铌镁-锆-钛酸铅 铌铈-锆-钛酸铅
铌铈-锆-钛酸铅 铌铈-锆-钛酸铅 铌铈-锆-钛酸铅等

低机电耦合系数 (k_p) 压电陶瓷:

铌铈-锆-钛酸铅 铌铈-锆-钛酸铅等

高机械品质因数 (Q_m) 压电陶瓷:

铌铈-锆-钛酸铅 铌铈-锆-钛酸铅等

高介电常数 (ϵ) 压电陶瓷:

铌铈-锆-钛酸铅 铌铈-锆-钛酸铅等

高稳定性压电陶瓷:

铌铈-锆-钛酸铅 铌铈-锆-钛酸铅

铌铈-锆-钛酸铅 铌铈-锆-钛酸铅

铌铈-锆-钛酸铅 铌铈-锆-钛酸铅

铌铈-锆-钛酸铅等

高功率材料:

铌铈-锆-钛酸铅 铌铈-锆-钛酸铅等

铌酸盐系陶瓷

niobate system ceramics

铌酸盐系压电陶瓷是具有氧八面体结构的铁电材料, 各种铌酸盐分别属于钙钛矿型、钙钛矿型和焦绿石型 (如 $\text{Cd}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$) 等结构。它们的性能虽然不如锆钛酸铅系压电陶瓷优越, 但它们的居里点高, 介电常数低, 以及声传播速度高, 因此应用在高频换能器方面就显得比锆钛酸铅效果好。

铌酸盐系压电陶瓷有铌酸钾、铌酸钾钠、铌酸锂钠、铌酸钡钠、铌酸铈钡、偏铌酸铅、偏铌酸铅钡和焦铌酸镉等。其中以铌酸钾钠、偏铌酸铅和偏铌酸铅钡较为常用, 它们的性能见下表。

常用的铌酸盐系陶瓷的性能

性能 材料	k_p	k_{31}	k_{33}	k_t	$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	d_{33} 10^{-12} 库仑/牛顿	d_{31} 10^{-12} 库仑/牛顿	Q_M	Q_E	频率常数 赫·米/秒	居里点 ℃	密度 10^3 公斤/米 ³	用途
偏铌酸铅 PbNb_2O_6	0.07	0.045	0.38	0.37	225	85	-9	11	100	—	570	6.0	适用于超声检测
偏铌酸钡钡 $\text{Pb}_{0.6}\text{Ba}_{0.4}\text{Nb}_2\text{O}_6$	0.38	0.22	0.55	—	1500	220	-90	250	100	1915	260	5.9	适用于超声波发射器
铌酸钾钠 $\text{K}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{NbO}_3$ (热压的)	0.46	0.27	0.605	0.46	496	127	-51	240	70	2570	420	4.46	适用于高频机电换能器、超声延迟线换能器等

三、压电、铁电晶体

晶体

crystals

晶体是结晶质点(原子、离子、分子等)在空间有规则排列组成的具有空间点阵结构的多面体形态的物体。晶体与非晶体的基本区别在于晶体具有各向异性、最小内能和固定熔点。绝大多数元素和化合物都能形成晶体。凡具有基本上完整的空间点阵结构的晶体叫做单晶,很多小单晶的无序凝聚体叫做多晶。工业技术应用的晶体材料一般是指单晶体。

晶体具有对称性。为了认识晶体的几何性质,根据结晶学的研究,将所有晶体按宏观对称性区分为7大晶系和32种点群,按微观对称性区分为14种空间点阵和230种空间群。

目前已发现的晶体有数千种,根据它们的特性或在电子工业技术领域的用途,可以划分为若干类型,见下表。

按特性或用途区分的晶体类型

类 型	代表性晶体①
压电晶体	石英
热释电晶体	硫酸三甘肽
铁电晶体	钛酸钡
反铁电晶体	磷酸二氢铵
铁磁性晶体	钕酸钆
声光晶体	钽酸锂
电光晶体	磷酸二氢钾
非线性光学晶体	铌酸锂钠
激光工作物质	掺钕钇铝石榴石
红外探测晶体	碲镉汞单晶
半导体晶体	锗、硅单晶
磁性晶体	钇铁石榴石

① 一种晶体可能具有多重特性和多种用途。

压电晶体

piezoelectric crystals

具有压电效应的晶体称为压电晶体(压电单晶)。晶体是否有压电性,是由晶体的结构对称性这个内因所制约的。结构上有对称中心的晶体无压电性,只有无对称中心的晶体才可能有压电性。因此,压电晶体只能是属于二十一种点群对称性(即1, 2, m , 222, 2mm, 4, 422, 4mm, $\bar{4}$, $\bar{4}2m$, 3, 32, 3m, 6, 622, 6mm, $\bar{6}$, $\bar{6}m2$, 23, $\bar{4}3m$, 432)的晶体。

目前已发现的具有压电性的晶体有几千种。有应用价值的主要压电晶体,有水晶(石英晶体)、钛酸钡、酒石酸钾钠、磷酸二氢铵、磷酸二氢钾、铌酸锂、钽酸锂、镓酸锂、锗酸锂、锗酸铋、碘酸锂、二氧化碲、硫碘化铋等等。有一些半导体也具有压电性,如氧化锌、硫化镉、硫化锌、硒化镉等。

压电晶体广泛应用在电子技术、超声工程和激光红外技术等方面。

石英晶体

quartz crystal

石英晶体又称水晶,是重要的压电材料。其化学成分是二氧化硅(SiO_2),熔点为1750°C,密度为2.65克/厘米³,莫氏硬度为7。高质量的石英是无色透明体。

早期使用的石英晶体是天然石英,由于天然石英产量有限,能用来制造石英谐振器的天然石英就更少。近一、二十年来用水热合成法培育人造石英有很大发展,生长技术日益完善。现在的人造石英的质量完全可与天然石英比美,甚至超过天然石英。

β 石英 β -quartz

石英晶体有两种结构, 在 573°C 以上是高温型结构, 称为 β 石英; 在 573°C 以下, 是低温型结构, 称为 α 石英。

β 石英属于六角晶系 622 点群, 有一个六次轴 (即六次旋转对称轴), 六个互成 60° 夹角的二次轴, 无对称中心, 具有压电效应。

 α 石英 α -quartz

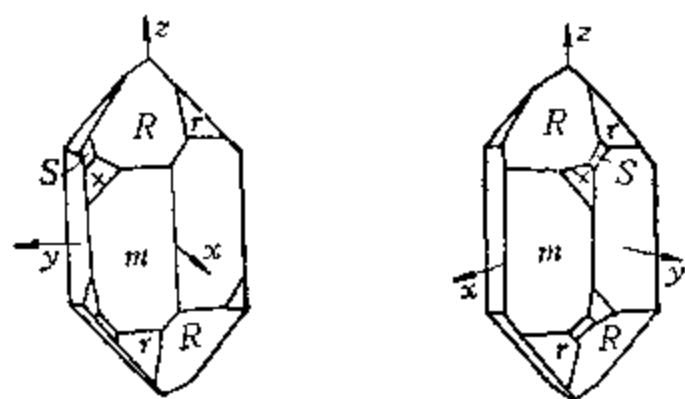
α 石英属于三角晶系 32 点群, 有一个三次轴, 三个互成 120° 夹角的二次轴, 无对称中心, 具有压电效应。晶体的 c 轴与三次轴平行, 三个 a 轴分别与三个二次轴平行。

左旋石英

left-handed quartz

根据光线沿 c 轴通过石英时 (面对射来的光线看去), 偏振面是沿逆时针方向 (左旋) 旋转, 还是沿顺时针方向 (右旋) 旋转, 可将石英区分为左旋石英和右旋石英。

这两类石英的外形也不相同, 如图所示。



左旋石英

右旋石英

石英晶体的完整外形

右旋石英

right-handed quartz

见“左旋石英”。

石英的坐标轴

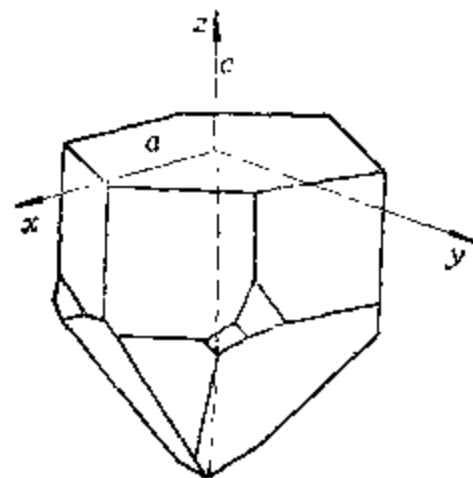
coordinate axes of quartz

石英是各向异性体, 坐标轴的取向不同, 所得的结果也不同, 所以要对坐标轴的选择

作一共同的规定。

石英的坐标轴 xyz 如图所示, 其中 z 轴与石英的上、下顶角连线重合 (即与石英的 c 轴重合); x 轴与两棱面间夹角的平分线重合 (即与 a 轴重合); y 轴与两棱面的垂线重合。目前一些资料中, 左旋石英和右旋石英一般采用右手坐标系。按照这个规定, 在 x 方向施加压力时, 对于右旋石英, x 轴的正向带正电; 对于左旋石英, x 轴的正向带负电。由此可见, 左、右旋石英的 x 轴的极性正好相反。

另一些资料中, 左旋石英采用左手坐标系。按照这个规定, 在 x 方向施加压力时, 左旋石英 x 轴的正向带正电。

**光轴**

optical axis

石英晶体的 z 轴又称光轴, 因为光线沿此方向通过晶体时不产生双折射现象。

电轴

electrical axis

石英晶体的 x 轴又称为电轴, 因为沿此方向施加压力时, 产生的压电效应最显著, 形变最大。

机械轴

mechanical axis

石英晶体的 y 轴又称为机械轴, 因为沿此方向施加压力时, 产生的形变最大, 但不出现沿 y 方向的压电效应。

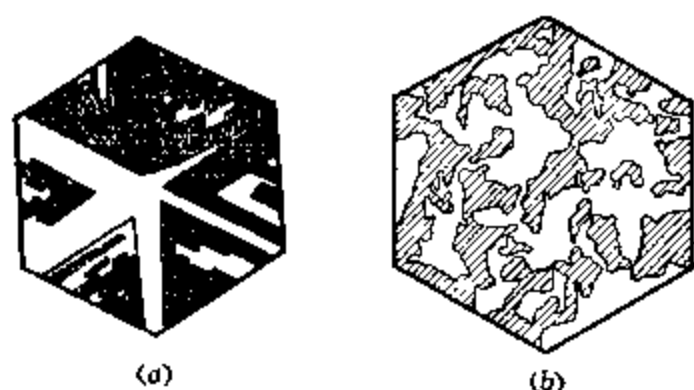
光双晶

optical twinning

在一块晶体中,同时存在左旋和右旋两部分,称为光双晶。

在一块晶体中,同时存在两个左旋(或右旋)部分,其中之一绕光轴转 180° 后,才与另一部分接合。因为这两部分的极性相反,故称为电双晶。

光双晶和电双晶多出现在天然石英中,其边界可用腐蚀方法显示出来,如图所示。



图五 光双晶(a)和电双晶(b)

石英片中不允许含有电双晶或光双晶部分。

石英的疵病除上述双晶外,还有裂痕、气泡和杂质等,后一种疵病,在人造石英中也有。

电双晶

electrical twining

见“光双晶”。

石英元件

quartz element

石英元件常简称为石英片。它是从石英晶体切下来的,有给定的几何形状和尺寸,以及对晶体坐标有一定取向的石英片或石英棒等。

石英振子

quartz vibrator

被电极后的石英片,称为石英振子。当交变电场作用在振子的两个电极上时,它即产生相应的振动。

切型

cut

对晶体坐标轴某种取向的切割,称为切

型。不同切型的物理性质也不相同。例如,

(1) 不同切型的振动模式不一样,同一切型用不同方向的电场激励(或者说用不同方向的电极)时,其振动模式也不一样。常用切型的振动模式有:伸缩振动模式、面切变振动模式、厚度切变振动模式和弯曲振动模式等。

(2) 不同切型的温度特性不一样,工作温度范围也不一样。

切型符号

cut symbols

石英的切型符号有两种表示法。

一种是 IRE 标准规定的符号表示法,例如, $(yxl) + 35^\circ$ 切型,其中,第一个字母 y 表示石英片的厚度沿 y 轴方向,第二个字母 x 表示石英片的长度沿 x 轴方向,第三个字母 l 和角度 $+35^\circ$ 表示石英片绕长度 l 逆时针旋转 35° ,如图 1 所示。又如 $(xytl) + 5^\circ / -50^\circ$ 切型,表示石英片的厚度沿 x 轴方

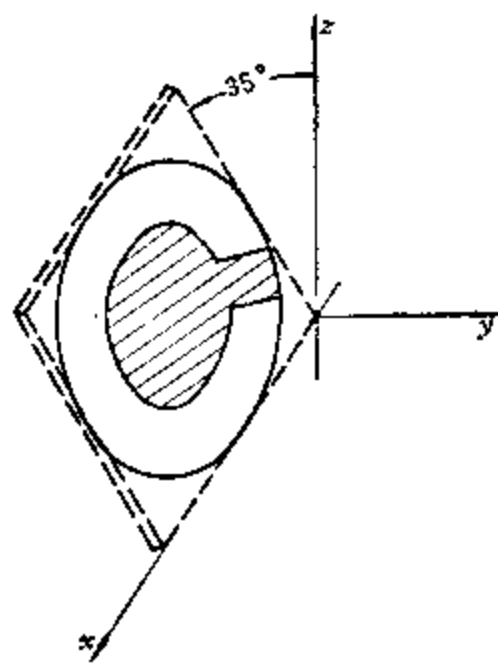
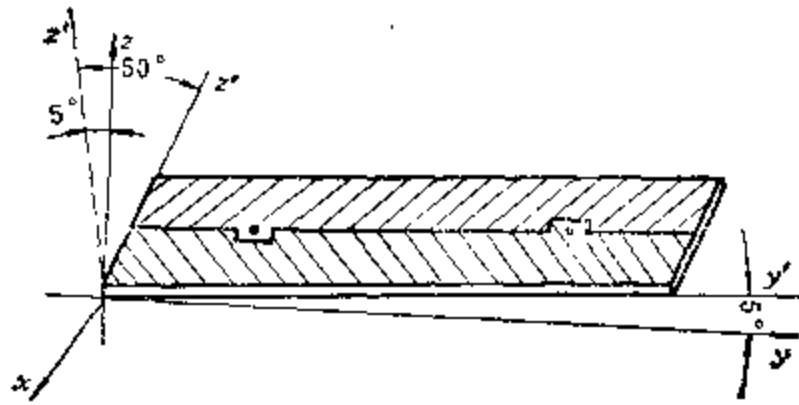


图1 $(yxl) + 35^\circ$ 切型

向,长度沿 y 轴方向,先绕厚度 t 逆时针旋转 5° 后,再绕长度 l 顺时针旋转 50° ,如图 2 所示。总之,IRE 标准规定的切型符号包括一组字母 (x, y, z, t, l, w) 和角度。用 (x, y, z) 中二个字母的先后排列来表示石英片的厚度和长度沿坐标轴的原始方

图2 $(xyt) + 5^\circ / - 50^\circ$ 切型

位；用字母 t (厚度)、 l (长度)、 w (宽度)，表示旋转轴的方向，角度的正号表示逆时针旋转，负号表示顺时针旋转。

另一种是老的习惯符号，例如，AT、BT、CT、DT、NT、MT等等，这两种符号的对应关系见下表。

常用切型的性能

	切型	振动模式	泛音次数	使用频率范围 (KHz)	石英片形状	频率温度特性
AT	$(yxt) + 35^\circ \sim 35^\circ 30'$	厚度切变	基频	500~20000	长方形	三次曲线
	$(4^\circ \sim 35^\circ 28')$		3, 5, 7 泛音	15000~250000	正方形圆形	$(\rightarrow 0)$
BT	$(yxt) - 49^\circ \sim - 50^\circ$	厚度切变	基频	3000~22000	正方形圆形	二次曲线 $(\rightarrow 0)$
CT	$(yxt) 37^\circ \sim 38^\circ$	面切变	基频	200~500	正方形圆形	二次曲线 $(\rightarrow 0)$
DT	$(yxt) 52^\circ \sim 53^\circ$	面切变	基频	100~350	正方形圆形	二次曲线 $(\rightarrow 0)$
GT	$(xyt) 51^\circ 07' / 45^\circ$	伸缩	基频	90~250	长方形	三次曲线 $(\rightarrow 0)$
MT	$(xyt) 0^\circ \sim 8.5^\circ / \pm 34^\circ \sim \pm 50^\circ$	伸缩	基频	50~200	长方形	二次曲线 $(\rightarrow 0)$
NT	$(xyt) 0^\circ \sim 8.5^\circ / \pm 38^\circ \sim 70^\circ$	长宽弯曲	基频	10~100	细长片	二次曲线 $(\rightarrow 0)$
$x + 5^\circ$	$(xyt) + 5^\circ$	长度伸缩	基频	40~200	细长片	二次曲线 $(\rightarrow 0)$
		双弯曲	基频	1~10	细长片	二次曲线 $(\rightarrow 0)$
		xy 弯曲	基频	2~20	细长棒	二次曲线 $(\rightarrow 0)$
$x - 18.5^\circ$	$(xyt) - 18.5^\circ$	长度伸缩	基频	60~100	长方形	直线 $(-20 \times 10^{-6}/^\circ\text{C})$
x	xy	厚度伸缩	基频	350~20000	长方形圆形正方形	直线

注：GT切型一般是用作精密石英谐振器，但由于加工复杂，体积较大，近来很少采用。ET也因激励较难，近来也大多不采用。

热释电晶体

pyroelectric crystals

具有热释电效应的晶体称为热释电晶体。热释电晶体除要求结构上不具有对称中心之外，还要求具有自发极化。因此，只有属于十种点群对称性(即 $1, 2, m, 2mm, 4, 4mm, 3, 3m, 6, 6mm$) 的晶体才可能具有热释电效应。

利用晶体的热释电效应，可以制造红外热释电探测器、红外热释电摄像管等。

目前已发现具有热释电性的晶体有一千

多种，具有应用价值的主要有硫酸三甘肽(TGS)、硫酸三甘肽与硒酸三甘肽的混晶(TGS/TGSe)、硫酸锂、钛酸铅、硫酸铈、铌酸锶钡、硫酸化铈、亚硝酸钠、钽酸锂、铌酸锂等。

铁电晶体

ferroelectric crystals

具有铁电性的晶体称作铁电晶体(见“铁电性”)。

具有铁电性的晶体必须是属于十种点群对称性 ($1, 2, m, 2mm, 4, 4mm, 3, 3m,$

6, 6mm) 的晶体。

熟知的铁电晶体有: 酒石酸钾钠、磷酸二氢钾、钛酸钡、铌酸钾、钛酸铅、铈酸锂、铈酸锶钡、硫酸三甘肽等。

利用铁电晶体的铁畴极化反转特性, 可制作图象储存和固体显示器件。由于铁电晶体一般多具有高介电常数和优良的压电、热释电性能, 所以常作为高介材料、压电材料和热释电材料使用。

反铁电晶体

antiferroelectric crystals

反铁电体同铁电体一样, 具有介电性能随温度变化的异常特性, 有居里温度。反铁电体与铁电体不同的是它没有自发极化, 从结构上可以看作是由两个具有反平行电偶极矩的子晶格构成的。在外电场作用下, 反铁电相能够转变为铁电相。在电场与极化关系曲线上呈现“双滞后回线”。反铁电体可做储能电容器, 利用它的相变效应, 可在换能等方面得到应用。

熟知的反铁电体有磷酸二氢铵、锆酸铅、铪酸铅、铌酸钠、三氧化钨和以锆酸铅-铪酸铅-钛酸铅三元系固溶体为主要成分的反铁电陶瓷等。

电光晶体

electro-optic crystals

具有电光效应的晶体称为电光晶体。它的主要用途是做电光调制器、偏转器、光全息存储器、光开关等。

主要电光晶体有磷酸二氢钾、磷酸二氘钾、砷酸二氢铯、砷酸二氘铯、氯化亚铜、硫化锌、铈酸锂、钽酸锂、钽铌酸钾、钼酸钒、铈酸锶钡等晶体。

声光晶体

acousto optic crystals

具有声光效应的晶体称为声光晶体。利用声光效应来控制入射光的偏转或调制, 在激光应用上颇为重要。目前已利用声光效应

制成声光调制器、偏转器、相关器、光开关、扫描器等。

主要声光晶体有钼酸铅、二氧化碲、硫化汞、 α 碘酸、锆酸铋、锆钒酸铅等。

酒石酸钾钠

sodium potassium tartrate tetrahydrate

酒石酸钾钠 ($\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) 为无色透明的水溶性晶体, 有两个铁电居里点, 在下居里点 (-18°C) 和上居里点 ($+24^\circ\text{C}$) 之间为铁电相, 属单斜晶系, 点群对称性为 2。自发极化在 [100] 方向的最大值为 0.25×10^{-2} 库仑/米² ($+5^\circ\text{C}$)。在两居里点范围以外, 晶体呈非铁电相, 属正交晶系, 点群对称性为 222, 仍具有压电性。在 20°C 时, 晶格常数 $a = 11.867$ 埃, $b = 14.236$ 埃, $c = 6.213$ 埃。密度为 1.775 克/厘米³。

酒石酸钾钠晶体的介电常数 $\epsilon_{11}/\epsilon_0 = 189$; 对于 $\alpha - 45^\circ$ 切割的晶片, 机电耦合系数 $k_{31} = 0.65$, 压电常数 $d_{31} = 275 \times 10^{-12}$ 库仑/牛顿。它对水或有机液体的声阻抗匹配要比石英或压电陶瓷好, 主要用作压电换能器材料。缺点是机械强度低, 易于风化、潮解和分解, 压电性能随温度变化很大。因此, 应用上受到限制, 已逐渐被其它材料所取代。

大块酒石酸钾钠单晶用水溶液降温法生长。

罗息盐

Rochelle salt

即“酒石酸钾钠”。

息格涅特盐

Seignette salt

即“酒石酸钾钠”。

磷酸二氢铵

ammonium dihydrogen phosphate (ADP)

磷酸二氢铵 ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) 是无色透明的水溶性晶体。其反铁电居里点为 -125°C , 在这个温度以下, 晶体呈反铁电性。室温时属顺电相 (既无铁电性, 又无反铁电性), 但

有压电性。它属四角晶系，点群对称性为 $\bar{4}2m$ ，晶格常数 $a = b = 7.502$ 埃、 $c = 7.546$ 埃，密度为 1.803 克/厘米³。

磷酸二氢铵晶体具有良好的压电和电光性能，可耐温至 100°C ，在相对湿度 93% 时潮解。它的主要性能：

介电常数 $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0 = 15.3$ ；

介质损耗角正切值 $\text{tg}\delta = 0.03$ ；

折射率 $n_o = 1.5250$ ， $n_e = 1.4811$ ($\lambda = 0.559$ 微米)；

透光范围 $0.2 \sim 1.4$ 微米；

线性电光系数 ($\lambda = 0.556$ 微米， 20°C)

$\gamma_{41} = 20.8 \times 10^{-12}$ 米/伏，

$\gamma_{63}^T = -8.57 \times 10^{-12}$ 米/伏，

$\gamma_{63}^S = -4.77 \times 10^{-12}$ 米/伏；

半波电压 10.6 千伏；

压电常数 ($z-45^{\circ}$ 切割) $d = 24 \times 10^{-12}$ 库仑/牛顿；

机电耦合系数 $k = 0.28$ 。

磷酸二氢铵晶体主要用作光通信中的光调制器、高速电光开关、X 光荧光分析谱仪中的分光晶体等，也曾用作声纳装置的换能器材料。

大块磷酸二氢铵单晶用水溶液降温法生长。

磷酸二氢钾

potassium dihydrogen phosphate (KDP)

磷酸二氢钾 (KH_2PO_4) 是无色透明的水溶性晶体，外形由四方柱与四方锥组成。室温时属四角晶系，点群对称性为 $\bar{4}2m$ ，晶格常数 $a = b = 7.453$ 埃、 $c = 6.975$ 埃，密度为 2.34 克/厘米³。铁电居里点为 -150°C ，铁电相属正交晶系，点群对称性为 $2mm$ 。 -177°C 时的自发极化为 4.75×10^{-6} 库仑/厘米²。

磷酸二氢钾晶体的透光范围为 $0.2 \sim 1.55$ 微米，线性电光系数 $\gamma_{41} = 8.8 \times 10^{-12}$ 米/伏、 $\gamma_{63}^T = 10.3 \times 10^{-12}$ 米/伏，半波电压为

7.65 千伏，折射率 $n_o = 1.509$ 、 $n_e = 1.468$ ($\lambda = 0.6$ 微米)，介电常数 $\epsilon_{11}/\epsilon_0 = 42.3$ ， $\epsilon_{33}/\epsilon_0 = 19.7$ 。

磷酸二氢钾晶体是一种性能较好的电光晶体，使用广泛，主要用作光通信和激光大屏幕显示中的激光调制器、电光开关、固态光阀显示器件等。

大块完美的磷酸二氢钾单晶用水溶液降温法生长。

磷酸二氘钾

potassium dideuterium phosphate
(DKDP, KD*P)

磷酸二氘钾 (KD_2PO_4) 是用氘置换磷酸二氢钾中的部分氢离子而成的化合物，室温时属四角晶系，点群对称性为 $\bar{4}2m$ ，晶格常数 $a = 7.468$ 埃， $c = 6.930$ 埃。密度为 2.34 克/厘米³，居里点约为 -60°C ， -93°C 时自发极化为 4.83×10^{-2} 库仑/米²。

磷酸二氘钾晶体的电光性能全面优于磷酸二氢钾，线性电光系数 $\gamma_{41} = 8.8 \times 10^{-12}$ 米/伏， $\gamma_{63}^T = -26.4 \times 10^{-12}$ 米/伏，透光范围为 $0.2 \sim 2.5$ 微米，在 $\lambda = 0.546$ 微米时，折射率 $n_o = 1.508$ 、 $n_e = 1.468$ ，半波电压为 3.4 千伏。

用途与磷酸二氢钾同，但其性能更符合于激光的要求。例如，作 Q 开关时，在 50 兆瓦/厘米² 激光脉冲 (约 20 次/秒) 照射下，能连续工作而不碎裂，不变质。

磷酸二氘钾单晶用降温法从重水中生长，在生长过程中应注意隔绝空气中的水汽和含氢物质，育晶器要用空气浴恒温。

磷酸二氘铯

cesium dideuterium arsenate (DCsDA)

磷酸二氘铯 (CsD_2AsO_4) 属 KDP 型水溶性晶体，是以氘置换磷酸二氢铯中的部分氢离子而成的化合物。

磷酸二氘铯的居里点为 -61°C ，室温下属四角晶系，点群对称性为 $\bar{4}2m$ 。它是目前

发现的同型磷酸盐和砷酸盐中线性电光效应最大的一种晶体,也是迄今发现的纵向调制半波电压较低的一种晶体。在 $\lambda = 5500$ 埃时,线性电光系数 $\gamma_{33} = 36.6 \times 10^{-10}$ 厘米/伏;半波电压为1.95千伏。由于半波电压低,适于在固态显示技术和光信息存储中作电光调制器和电光开关。作倍频晶体使用时有较高的转换系数。该晶体的缺点是易潮解,成本高。

砷酸二氘铯晶体用溶液降温法在重水中生长。

铌酸钾

potassium niobate (KN)

铌酸钾(KNbO_3)晶体有三种不同的组成: KNbO_3 、 KNb_3O_8 和 $\text{K}_4\text{Nb}_6\text{O}_{17}$ 。其中 KNbO_3 晶体的性能较好,一般称铌酸钾均指 KNbO_3 。

铌酸钾单晶有三个相变点:在 -10°C 以下为三角晶系,点群对称性为 $3m$;在 $-10 \sim +225^\circ\text{C}$ 之间为正交晶系,点群对称性为 $2mm$;在 $+225 \sim 435^\circ\text{C}$ 之间为四角晶系,点群对称性为 $4mm$;在 435°C 以上为立方晶系,点群对称性为 $m\bar{3}m$ 。

刚生长的晶体为多畴态,外观为云雾状半透明体,呈蓝颜色者为高导电体,无色或淡红棕色者为良好绝缘体。无色体的透光范围是 $0.4 \sim 5.5$ 微米。晶体的自发极化为 30×10^{-2} 库仑/米²,多畴晶体在 190°C 下施加1千伏/厘米的电场即可极化成高光学质量的单畴晶体。

铌酸钾单晶具有非线性光学效应,其倍频效率比铌酸钡钠晶体的高,且耐强绿光辐射。铌酸钾单晶的热导率也比铌酸钡钠的大,所以,一般认为铌酸钾晶体适合用作掺钕钇铝石榴石($\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$)激光器的倍频材料。

铌酸钾单晶以高纯碳酸钾和氧化铌为原料用助熔剂提拉法生长。

钛酸钡

barium titanate (BT)

钛酸钡(BaTiO_3)是有代表性的一种铁电体,属钙钛矿型结构。铁电居里点为 120°C 。在居里点以上属立方晶系顺电相,在居里点以下属四角晶系铁电相,点群对称性为 $4mm$ 。室温时晶格常数 $a = b = 3.992$ 埃, $c = 4.035$ 埃。室温时自发极化为 26×10^{-6} 库仑/厘米²。在 0°C 以下,晶体转变为正交晶系铁电相,在 -80°C 以下更转变为三角晶系铁电相。

钛酸钡不溶于水,密度为 6.02 克/厘米³,熔点为 1618°C ,介电常数 $\epsilon_{11}/\epsilon_0 = 4000$, $\epsilon_{33}/\epsilon_0 = 160$ 。

可用熔盐法生长出小片淡黄色透明的“蝴蝶形双晶”,也可用提拉法生长出尺寸较小的单晶。

由于钛酸钡单晶生长较为困难,目前实际使用的主要是钛酸钡陶瓷材料(见“钛酸钡陶瓷”)。

铌铌酸钾

potassium tantalate-niobate (KTN)

铌铌酸钾($\text{KTa}_x\text{Nb}_{1-x}\text{O}_3$)单晶属钙钛矿结构,点群对称性为 $4mm$ 。其性质随Ta与Nb的原子数比不同(一般以 $x = 0.65$ 为多,也有 $x = 0.62$ 的)而异。以 $x = 0.65$ 组成的晶体的性能是:

折射率 $n_0 = 2.318$, $n_e = 2.270$, $\Delta n_{\text{最大}} = -6.3 \times 10^{-3}$;

介电常数 $\epsilon_s = 20000$;

居里点约 10°C ;

半波电压110伏;

一次电光系数

$$|\gamma_{33} - \gamma_{31}| = 500 \times 10^{-12} \text{米/伏},$$

$$\gamma_{42} = 16000 \times 10^{-12} \text{米/伏};$$

二次电光系数 $g_{11} = +0.136 \text{米}^4/\text{库仑}^2$,

$$g_{12} = -0.038 \text{米}^4/\text{库仑}^2,$$

$$g_{44} = +0.147 \text{米}^4/\text{库仑}^2。$$

钽铌酸钾单晶以高纯碳酸钾、氧化铌和氧化钽为原料,用提拉法生长。

钽铌酸钾是电光晶体,用于制作电光调制器时,激励功率比钽酸锂小一个数量级,但在性能上还存在缺点,有待进一步改进和提高。

铌酸锂

lithium niobate

铌酸锂(LiNbO_3)单晶是一种无色或略带黄绿色的透明晶体,点群对称性为 $3m$,在 23°C 时晶格常数 $a_{\text{hex}}=5.1483$ 埃、 $c_{\text{hex}}=13.863$ 埃, $z=6$ ($a_{\text{rx}}=5.4944$ 埃、 $\alpha=55^\circ52'$, $z=2$),熔点 1253°C ,居里点 1210°C ,在 4°C 时的密度为 4.64 克/厘米³,莫氏硬度为5。

铌酸锂具有压电、铁电、热释电、电光和声光等效效应,是一种多用途的晶体。它的主要性能:声速,纵波 $[100]$ 为 6.57×10^5 厘米/秒,横波 $[001]$ 为 3.59×10^5 厘米/秒;超声吸收系数为 0.15 分贝/厘米·千兆赫²;声衰减(在 1000 兆赫, x 切割纵模)为 1.7 分贝/微秒;机电耦合系数(x 切割剪切模) $k_{15}=0.68$;机械品质因数 Q_m 为 10^5 ;折射率(室温下) $n_o=2.286$, $n_e=2.200$ ($\lambda=0.6328$ 微米);半波电压为 2.94 千伏;线性电光系数 $\gamma_e=19 \times 10^{-12}$ 米/伏。

铌酸锂单晶用高纯氧化铌和碳酸锂为原料,用提拉法生长。

铌酸锂晶体主要用于制作压电换能器、超声延迟线介质、电光调制器、参量振荡器、电光Q开关、全息存储介质、表面波器件等。

铌酸锂晶体的激光损伤阈值较低,在强光照射下,出现折射率局部变化,正在进一步改进中。

钽酸锂

lithium tantalate

钽酸锂(LiTaO_3)单晶为无色或淡黄色透明体,点群对称性为 $3m$,在 25°C 时晶格

常数 $a_{\text{hex}}=5.15428$ 埃, $c_{\text{hex}}=13.78351$ 埃,熔点为 1650°C ,居里点为 $665 \pm 5^\circ\text{C}$,密度为 7.456 克/厘米³。

钽酸锂晶体的机电耦合系数 k_{15} 可达 0.40 以上;机械品质因数 Q_m 也较高;声速,纵波 $[001]$ 为 6.19×10^5 厘米/秒,横波 $[001]$ 为 3.39×10^5 厘米/秒;声衰减 1 千兆赫时为 0.08 分贝/厘米。透光范围为 $0.4 \sim 4$ 微米;折射率 $n_o=2.175$, $n_e=2.18$ ($\lambda=0.633$ 微米);半波电压为 2.84 千伏;电光系数 $\gamma_e^T=0.22 \times 10^{-10}$ 米/伏, $\gamma_e^S=0.28 \times 10^{-10}$ 米/伏。钽酸锂晶体具有优异的电光和声光性能(声光性能指数: $M_e=1.4 \times 10^{-18}$ 秒³/克, $M_s=11 \times 10^{-7}$ 厘米²·秒/克),耐激光损伤性能比铌酸锂好。

钽酸锂单晶以高纯氧化钽和碳酸锂为原料,用提拉法生长。

钽酸锂单晶主要用于制作宽带晶体滤波器、宽频带频率相位调制器、超声延迟线介质、压电换能器、全息存储介质、表面波器件等。

铌酸钡钠

barium sodium niobate (NBN, BNN)

铌酸钡钠($\text{NaBa}_2\text{Nb}_5\text{O}_{15}$)晶体为无色或微带黄色的透明体,具有完全填满型钨青铜结构。它在室温下属正交晶系,点群对称性为 $2mm$; 260°C 以上转变为四角晶系,点群对称性为 $4mm$ 。它的居里点为 560°C ,室温晶格常数 $a=17.59$ 埃、 $b=17.61$ 埃、 $c=7.98$ 埃,熔点为 1429°C ,密度为 5.076 克/厘米³,折射率 $n_a=2.326$ 、 $n_b=2.324$ 、 $n_c=2.221$ ($\lambda=0.633$ 微米),半波电压为 1.72 千伏,相对介电常数 $\epsilon_{11}^r/\epsilon_0=246$ 、 $\epsilon_{22}^r/\epsilon_0=242$ 、 $\epsilon_{33}^r/\epsilon_0=51$ 。该晶体的机电耦合系数较高, z 切割晶片的 $k_t=0.57$,机械阻抗为 32.6×10^8 公斤/米²·秒。

铌酸钡钠是优良的非线性倍频晶体。它的相对非线性系数 $d_{31}/d_{36}^{\text{KDP}}=31$ 、 $d_{32}/d_{36}^{\text{KDP}}$

$=31$ 、 $d_{33}/d_{36}^{\text{KDP}}=42$ ($d_{36}^{\text{KDP}}=3.649$ 库仑/伏²)， $\lambda=0.633$ 微米时的电光系数为 $n_o^3\gamma_{13}=(2.3\pm0.4)\times10^{-10}$ 米/伏、 $n_o^3\gamma_{23}=(1.7\pm0.4)\times10^{-10}$ 米/伏、 $n_e^3\gamma_{33}=(6.2\pm0.4)\times10^{-10}$ 米/伏，对于 1.06 微米的基波相匹配角 $\theta_m=90^\circ$ 时的相匹配温度 T_m 约为 100°C 左右，在波长 0.4~5.0 微米范围是透明的。

铌酸钡钠晶体以高纯氧化铌、碳酸钠和碳酸钡为原料，用提拉法生长。由于存在相变、微孪晶、开裂和生长条纹等缺陷，所以欲获得优质晶体对生长条件有严格的要求。晶体生长和退火后还要进行去孪晶和退电畴处理。

铌酸钡钠作为 Nd:YAG 激光器的二次谐波发生具有很高的倍频效率，而且对于 0.53 微米的光损伤阈值也较高。除用于激光倍频器外，还可用于连续光参量振荡器和高频纵向横式换能器。

铌酸锶钡

strontium barium niobate (SBN)

铌酸锶钡($\text{Sr}_{1-x}\text{Ba}_x\text{Nb}_2\text{O}_6$)单晶属四角晶系钨青铜结构，点群对称性为 $4mm$ 。它的晶格常数随 Sr 与 Ba 的原子比而变化，当 $x=0.25$ ，温度为 25°C 时， $a=12.430$ 埃， $c=3.941$ 埃；熔点为 1470°C 左右；密度为 5.4 克/厘米³；莫氏硬度为 5.5；居里点也随 Sr 与 Ba 的原子比在 $40\sim200^\circ\text{C}$ 之间。当 $x=0.25$ 时的主要性能为：

居里点 55°C ；

折射率 $n_o=2.312$ ， $n_e=2.299$ ($\lambda=0.633$ 微米)；

介电常数 $\epsilon_0=3400$ ；

电光系数 $\gamma_{13}=0.66\times10^{-6}$ 米/伏，

$\gamma_{33}=1.34\times10^{-5}$ 米/伏，

$\gamma_{51}=0.42\times10^{-6}$ 米/伏；

纵波声速〔001〕 5.49×10^5 厘米/秒；

半波电压约 40 伏（横波， $\lambda=0.633$ 微米）；

声光性能指数

$M_d=10.8\times10^{-12}$ 厘米·秒²/克，

$M_s=593\times10^{-7}$ 厘米²·秒/克，

$M_a=8.62\times10^{-18}$ 秒³/克；

热释电系数

$dP/dT=0.31\times10^{-8}$ 库仑/厘米²·℃。

铌酸锶钡单晶的最突出特点是热释电效应很好，当 $x=0.25$ 时，热释电系数为铌酸钡单晶的 70 倍。

铌酸锶钡单晶以高纯氧化铌和碳酸锶、碳酸钡为原料用提拉法生长。它一般用于电学调制器和红外辐射探测器等方面。

碘酸锂

lithium iodate

碘酸锂(LiIO_3)单晶有两种晶体结构：六角 α 碘酸锂($\alpha\text{-LiIO}_3$) 和四角 β 碘酸锂($\beta\text{-LiIO}_3$)。实用的是六角 α 碘酸锂。其点群对称性为 6，晶格常数 $a=5.47$ 埃、 $c=5.16$ 埃，在 256°C 时有一个相变点，介电常数发生突变。它的熔点为 420°C ，密度为 4.7 克/厘米³，机械性能好，易加工。

碘酸锂单晶是极性晶体，但不是铁电体。它的压电效应较显著，机电耦合系数较大， $k_t=0.51$ ， $k_{18}=0.60$ ，相对介电常数 $\epsilon_{33}/\epsilon_0=6$ ， $\epsilon_{11}/\epsilon_0=8$ ，纵波〔001〕声速为 2.44×10^5 厘米/秒，衰减为 2.5 分贝/厘米(500 兆赫)。所以，它特别适用于制作高频宽带超声延迟线的换能器，应用在延迟线中能获得较好的结果。

碘酸锂的透光范围为 0.5~5.0 微米，非线性系数 $d_{31}^{30}/d_{36}^{\text{KDP}}=38\pm6$ ($\lambda=1.06$ 微米)。碘酸锂单晶的非线性光学效应，可用于激光倍频器件。

碘酸锂晶体用碘酸锂的饱和水溶液在恒温下缓慢蒸发水份的方法生长。

镓酸锂

lithium gallium oxide

镓酸锂(LiGaO_2)晶体为无色透明体，结

构属正交晶系, 点群对称性为 $2mm$, 熔点为 1570°C , 密度为 4.19克/厘米^3 , 莫氏硬度为 7.5。

镓酸锂单晶是一种优良的压电晶体, 其机电耦合系数比石英大二倍, z 切片机电耦合系数为 0.30, 介电常数为 8.5, 机械品质因数 Q_m 大于 10^5 , 纵波 $[001]$ 声速为 6.45×10^5 厘米/秒, 纵波 $[100]$ 声速为 3.5×10^5 厘米/秒。

镓酸锂晶体以碳酸锂和氧化镓为原料, 用水热法培育, 还可用提拉法或坩埚下降法生长。

镓酸锂单晶适于制作高频宽带换能器, 在乐甫波色散延迟线等器件中也开始应用。

锗酸锂

lithium germanium oxide

锗酸锂 (Li_2GeO_3) 单晶是无色透明晶体, 点群对称性为 $2mm$, 熔点为 $1218 \pm 4^{\circ}\text{C}$, 机电耦合系数 $k_p = 0.096$, 体纵波声速为 5.84×10^5 厘米/秒, 表面波声速为 3.35×10^5 厘米/秒, 机械品质因数 $Q_m = 12000$, 频率常数为 2900 赫·米 ($f_0 = 1.4$ 兆赫), 与氧化碲、钼酸铅 (PbMoO_4) 等晶体的机械阻抗的匹配性较好, 其声阻抗为 22.4×10^6 公斤/秒·米, 密度为 3.50克/厘米^3 。锗酸锂单晶能溶于盐酸中, 会被水侵蚀。

锗酸锂的压电和声学特性

方向	介电常数	机电耦合系数	声速 (10^5 厘米/秒)
$[100]$	7.2	$k_{15} = 0.038$	3.75①
$[010]$	7.5	$k_{25} = 0.075$	4.10②
$[001]$	12.1	$k_z = 0.31$	6.5

①、② 剪切波沿 $[001]$ 极化。

锗酸锂晶体以高纯碳酸锂和氧化锗为原料, 用提拉法生长。生长的晶体有平行于 z 轴的缺陷, y 面上有明显断裂面。

锗酸锂晶体可能用于制作表面波器件和声光偏转器中的声波换能器。

钛酸镧

lanthanum titanate

钛酸镧 ($\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$) 单晶是新近发现的一种优良的电光和压电晶体, 晶体结构属单斜晶系, 点群对称性为 2, 熔点为 1790°C 。

钛酸镧单晶具有一次电光效应和压电效应。其突出的特点是用高达 200千瓦/厘米^2 的 ($\lambda = 0.633$ 微米) 强激光照射无损伤; 温度稳定性好; 半波电压比钽酸锂低, 为 2.1 千伏; 机电耦合系数 $k_{22} = 0.29$; 切割加工性好; 作为电光调制材料, 其性能比钽酸锂好。

钛酸镧晶体是用悬浮区熔法生长的。

锗酸铋

bismuth germanium oxinde

锗酸铋 ($\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$) 为淡黄色透明晶体, 点群对称性为 23, 晶格常数 $a = 10.1455$ 埃, 密度 9.2克/厘米^3 , 熔点为 930°C , 无铁电性和热释电性。

锗酸铋晶体不仅压电性好, 且还有良好的声学性能。它的声速比铌酸锂小, 纵波沿 $[110]$ 方向为 3.42×10^5 厘米/秒, 横波沿 $[110]$ 方向为 1.77×10^5 厘米/秒。声速小这是其突出的优点, 可用于制造长延迟的延迟线。缩小超声延迟线的长度; 同时, 声衰减也小, 沿 $[110]$ 方向 500 兆赫时为 0.11 分贝/微秒; 机械品质因数 Q_m 大于 10^5 ; $[111]$ 晶片厚度伸缩模耦合系数约为 0.155, $[110]$ 晶片厚度剪切模耦合系数约为 0.235。

锗酸铋晶体是以纯氧化铋和氧化锗为原料, 用提拉法生长的。

锗酸铋晶体主要用于制作超声延迟线和表面声波器件。

锗酸铋还有一种分子式为 $\text{Bi}_4(\text{GeO}_4)_3$ 的晶体, 也是压电体, 可用作声光材料。

锗酸铅

lead germanium oxide; lead germanate

锗酸铅 ($\text{Pb}_5\text{Ge}_3\text{O}_{11}$) 是淡棕色透明晶体, 居里点为 177°C 。在居里点以上属六角晶系, 点群对称性为 $\bar{6}$; 在居里点以下属三角晶系, 点群对称性为 3。它的晶格常数 $a_{0.25} = 10.25$

埃, $c_{\text{hex}}=10.685$ 埃, 熔点为 738°C , 密度为 7.38 克/厘米³。锗酸铅晶体具有压电、电光、声光、旋光等特性。其介电常数和折射率是温度的函数, 机电耦合系数 $k_{31}=0.08$ 、 $k_{33}=0.13$, 100 兆赫下声衰减为 2 分贝/厘米。

锗酸铅单晶由于它的旋光性随自发极化的反向而反向, 因而受到重视, 有可能用作铁电电光显示和存储器件的重要材料。

锗酸铅晶体是以高纯氧化铅和氧化锗为原料, 用提拉法生长的。

硅酸铋

bismuth silicate

硅酸铋($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$)为茶黄色透明单晶, 属于体心立方结构, 点群对称性为 23。熔点为 900°C , 密度为 9.2 克/厘米³, 莫氏硬度为 4, 折射率为 2.55。透光范围 $0.45\sim 7.5$ 微米。

硅酸铋是一种兼有电光和光导效应的晶体。其电光系数 $\gamma_{41}=5\times 10^{-10}$ 厘米/伏, 半波电压 3900 伏, 暗场导电类型为 P 型, 光导载流子为 n 型。用硅酸铋晶体已制成普克尔光调制器, 这种器件不仅具有照相底板的功能, 且在实时系统中能用电学方法反复进行信息的写入、存储、显示与擦除。因此, 它可用于数码识别系统的相干光-非相干光转换器, 傅利叶平面滤波器和激光全息存储组页器等。

将 99.99% 的 Bi_2O_3 和 SiO_2 按 6:1 的克分子比混合, 用提拉法可生长出硅酸铋单晶。

二氧化碲

tellurium oxide

二氧化碲($\alpha\text{-TeO}_2$)有三种类型, 即金红石结构四角晶体、板钛矿结构正交晶体和对位黄碲矿结构准四角晶体。后者是目前能用人工培育的晶体, 点群对称性为 422, 品格常数 $a=4.796$ 埃、 $c=7.626$ 埃, 熔点为 733°C , 密度为 6.0 克/厘米³。这种晶体为无色透明体。

二氧化碲晶体的特点是: 沿 [110] 方向传输横波时声速为 0.616×10^5 厘米/秒; 光弹性常数大, 其 C_{66} 比 C_{11} 大 (与一般晶体相反); 声光性能指数较大, $M_s=793\times 10^{-18}$ 秒³/克; 在 (001) 面沿 x 轴 35.9° 方向上传播横波时, 室温附近声速具有零温度系数。

二氧化碲晶体的折射率 $n_o=2.274$ 、 $n_e=2.430$ ($\lambda=5893$ 埃), 机电耦合系数 k_p 约为 10%, 声衰减比一般晶体大, 特别是在 100 兆赫以上明显增大, 是主要缺点。其次, 二氧化碲原料具有较高蒸汽压, 在未熔化前已开始升华, 且毒性较大。

二氧化碲晶体是用高纯二氧化碲为原料, 用提拉法生长的。

二氧化碲晶体主要用作声光材料和用于长延迟的延迟线。

对位黄碲矿晶体

para-tellurite crystal

即“二氧化碲”。

氟化钡锰

barium manganese fluoride

氟化钡锰(BaMnF_4)是粉红色晶体, 结构属正交晶系, 点群对称性为 $2mm$ 。

该晶体具有铁电性能, 平行于 (010) 面具有良好的解理性, 在室温时有较强的顺磁性和压电性。其机电耦合系数 $k_{24}=0.255$, 热释电系数 $dP_s/dT\geq 3\times 10^{-9}$ 库仑/厘米²·℃, 自发极化强度 $P_s=-11.5\pm 1.5\times 10^{-6}$ 库仑/厘米²。

氟化钡锰晶体是采用熔盐法培育的, 也可用区熔化合合成。

碲碘化锑

antimony sulfide-iodide

碲碘化锑(SbSI)是一种三元化合物铁电半导体晶体, 属正交晶系, 居里点为 22°C , 在居里点以下点群对称性为 $2mm$ 。35℃ 时其品格常数 $a=8.527$ 埃, $b=10.138$ 埃, $c=4.089$ 埃。

碘化铋在居里点以下具有压电效应,它是目前机电耦合系数最大的压电材料, k_{33} 达0.9,且对静水压的反应较强,在18°C时静水压压电常数 $dh(=d_{33}+d_{31}+d_{32})$ 为 1600×10^{-12} 库仑/牛顿。与c轴平行方向的介电常数达 5×10^4 (22°C),而与c轴垂直方向的介电常数仅为25。密度为5.2克/厘米³,熔点约为400°C。

碘化铋晶体一般采用气相法生长,目前制出的晶体呈紫红色针状或小粒状,大尺寸的晶体生长技术尚在研究中。

钼酸钆

gadolinium molybdate

钼酸钆[Gd₂(MoO₄)₃]单晶有二种不同结构,α钼酸钆是热力学的稳定相,而β钼酸钆在室温时是热力学的亚稳相。

β钼酸钆晶体居里点为159°C,在居里点以下属正交晶系,点群对称性为2mm,25°C时晶格常数 $a=10.386$ 埃、 $b=10.419$ 埃、 $c=10.709$ 埃。在居里点以上属四角晶系,点群对称性为 $\bar{4}2m$ 。密度为4.43克/厘米³,熔点为1165°C。

钼酸钆晶体兼有铁电性、铁弹性、电光性和光弹性等性能。半波电压只有100伏。折射率 $n_o=1.848$ 、 $n_e=1.90$ (200°C,钠光)。

钼酸钆单晶用提拉法生长。

这种晶体可能成为光变元件的材料。用它可做成光阀、光开关、三原色滤波器、平面显示元件、彩色映象显示器等。

锗钒酸铅

lead germanate-vanadite

黄色锗钒酸铅[Pb₅(GeO₄)(VO₄)₂]是较新的声光晶体,但不是压电晶体,属磷灰石型六角晶系,点群对称性为6/m。晶格常数 $a=10.089$ 埃、 $c=7.393$ 埃,熔点为905°C,密度为7.15克/厘米³,莫氏硬度为4。声速 $V_x=3.11 \times 10^5$ 厘米/秒, $V_z=3.45 \times 10^5$ 厘米/秒, $V_{xz}=1.49 \times 10^5$ 厘米/秒, V_{xy}

$=1.66 \times 10^5$ 厘米/秒。声衰减:纵波[001]100兆赫时为0.5分贝/厘米;纵波[010]100兆赫时为0.9分贝/厘米,500兆赫时为3分贝/厘米。透光范围为0.52~5.5微米。折射率 $n_x=n_y=2.281$, $n_z=2.275$ ($\lambda=0.633$ 微米)。

锗钒酸铅有希望发展成为一种优质的声光晶体。

碲砷铊

thallium arsenic sulphide

碲砷铊(Tl₃AsS₄)晶体是一种新的透明声光晶体,但不是压电体,属正交晶系,点群对称性为2/m 2/m 2/m。晶格常数 $a=8.98$ 埃, $b=10.8$ 埃, $c=8.86$ 埃。熔点为419±2°C,密度为6.20克/厘米³,莫氏硬度为2.8。

碲砷铊单晶的主要性能:

透光范围 0.6~12微米;

透过率 约60%;

声速 纵波[001] 2.15×10^5 厘米/秒,

横波 1.21×10^5 厘米/秒;

声衰减 450兆赫 1.1分贝/微秒,

630兆赫 3分贝/微秒,

810兆赫 4分贝/微秒;

折射率 $\lambda=0.633$ 微米时, $n_a=2.829$, $n_b=2.774$, $n_c=2.825$,

$\lambda=1.06$ 微米时, $n_a=2.646$, $n_b=2.598$, $n_c=2.642$;

$\lambda=10.6$ 微米时 $n_a=2.542$, $n_b=2.498$, $n_c=2.541$;

声光性能指数($\lambda=0.633$ 微米)

纵波 $M_b=1040 \times 10^{-7}$ 厘米²·秒/克,

$M_c=800 \times 10^{-18}$ 秒³/克,

$M_a=480 \times 10^{-12}$ 厘米·秒²/克。

碲砷铊单晶用坩埚下降法生长,所用原料有剧毒。

钼酸铅

lead molybdate

钼酸铅晶体有二种不同组份(PbMoO₄

与 Pb_2MoO_5 。

PbMoO_4 晶体属四角晶系, 点群对称性为 $4/m$, 解理面垂直于 c 轴, 熔点约 1060°C 。这种晶体是较好的声光材料。光学质量好的单晶是用提拉法生长的。

Pb_2MoO_5 晶体属单斜晶系, 点群对称性为 $2/m$ 。它有一个平行于 $(20\bar{1})$ 的完全解理面, 于 950°C 一致熔融。沿 x 轴传播的纵波与沿 y 轴偏振的光束相互作用的性能指数大; 超声吸收系数小。因此, 它可用于制作偏转效率高、偏转速度中等的器件。同样可用提拉法生长大尺寸和光学质量好的单晶。

钼酸铅的主要性能

	PbMoO_4	Pb_2MoO_5
密度(克/厘米 ³)	6.95	7.10
声速(10^5 厘米/秒)	$3.63L[001]$ ① $1.96S[100]$	$2.96L(x')$ ②
超声吸收系数 (分贝/厘米·千兆赫 ²)	$15L[001]$	$45L(x')$
透光区(微米)	0.42~5.5	0.4~2.5
声光性能指数		
$M_h(10^{-7}$ 厘米 ² ·秒/克)	$113L[001]$	$242L(x')$
$M_e(10^{-18}$ 秒 ³ /克)	$36.1L[001]$	127
$M_d(10^{-12}$ 厘米·秒 ² /克)	$31.3L[001]$	82
机械阻抗 (千克/厘米 ² ·秒)	26×10^6	

① L —纵波; S —剪切波(横波)。

② (x') —光弹性轴方向。

钨酸碲

tellurium tungstate

钨酸碲(TeWO_6)为淡绿色透明单晶, 属三角晶系。熔点为 607°C , 密度为 7.859 克/厘米³, 折射率 $n_o=2.056$, $n_e=2.058$ ($\lambda=6328$ 埃), 透光范围为 $0.44\sim 5.3$ 微米。

钨酸碲是声光晶体, 其纵波声速 $V_s=2.04 \times 10^3$ 米/秒, 是固体中声速较慢的一种。它的性能指数 $M_{e(111)}=174 \times 10^{-18}$ 秒³/克, 约为钼酸铅或二氧化碲的纵声波时的四倍, 是可见光领域 M_e 值最大的晶体。在 100 兆赫下, x 轴和 z 轴方向声衰减分别为 1.5 分贝/微米和 0.5 分贝/微米。

将 TeO_2 和 WO_3 按 $1:1$ 克分子比混合

焙烧, 用感应加热提拉法在空气中可以生长出钨酸碲单晶, 生长方向为 c 轴和 a 轴。 c 面为解理面, 晶体的机械特性较差。同水反应后, 晶体表面白浊, 但不吸潮。

氮化铝

aluminium nitride

氮化铝(AlN)是浅黄色压电晶体, 其外形为片状或薄膜状, 属六角晶系纤维锌矿结构。其密度为 3.26 克/厘米³, 薄膜的机电耦合系数 k_{33}^t 约 0.30 , k_{33}^d 约 0.20 , 介电常数 $\epsilon_{33}^t=8.5$, 熔点大于 2900°C , 禁带宽度为 6.2 电子伏。另外, 它较高的表面波速度, 可以用简便的光刻技术来制作频带为千兆赫的换能器, 因而氮化铝是表面波技术的重要材料。

氮化铝晶体主要以薄膜形式应用, 薄膜是在蓝宝石基片上用外延法生长的。

硫化汞

mercury sulfide

硫化汞($\alpha\text{-HgS}$)是红色透明晶体, 其点群对称性为 32 , 密度为 8.1 克/厘米³, 室温时对 $0.6\sim 14$ 微米的光辐射透明。

实验室制得的矩形平面体硫化汞, 具有良好的性能。折射率 $n_o=2.887$, $n_e=3.235$ ($\lambda=0.633$ 微米), 声光性能指数 $M_h=1670 \times 10^{-7}$ 厘米²·秒/克, $M_e=960 \times 10^{-18}$ 秒³/克, $M_d=680 \times 10^{-12}$ 厘米·秒²/克, 分别为石英的 211 , 632 和 513 倍。在 500 兆赫时声衰减为 7.1 分贝/厘米。

硫化汞晶体是一种有希望的声光材料。

硫化汞晶体用水热法生长(稀盐酸溶液), 晶体不易长大。

朱砂

cinnabar

即“硫化汞”。

硫化镉

cadmium sulfide

硫化镉(CdS)为淡黄色透明晶体, 属六角晶系纤维锌矿结构, 点群对称性为 $6mm$,

晶格常数 $a_0=4.134$ 埃、 $c_0=6.749$ 埃。晶体硬度低且脆，精加工较困难，易起划痕。密度为 4.82 克/厘米³，常压下熔点为 1750°C ，但未到熔点就开始分解和升华，在 10 个气压下熔点为 $1475\pm 15^\circ\text{C}$ 。该晶体具有压电性和半导体特征，机电耦合系数 $k^2=0.04$ ，纵波声速为 4.47×10^5 厘米/秒，横波声速为 1.7×10^5 厘米/秒，电子迁移率为 $200\sim 400$ 厘米/伏·秒（随杂质含量不同而异），禁带宽度为 2.42 电子伏，电阻率为 $10^{-1}\sim 10^8$ 欧姆·厘米（随杂质含量不同而异）。

硫化镉单晶是一种比较重要的压电半导体晶体，可用作超声延迟线、声放大器、光调制器、光偏转器、光扫描元件等的材料，但目前正式使用还不多。其薄膜广泛地用作压电换能器材料。

硫化镉单晶是用气相升华法生长的，硫化镉薄膜是在硫气氛下真空蒸发生长的。

氧化锌

zinc oxide

氧化锌 (ZnO) 为淡黄色或淡黄绿色晶体，属六角晶系纤维锌矿结构，点群对称性为 $6mm$ ，晶格常数 $a_0=3.2495$ 埃、 $c_0=5.2069$ 埃。密度为 5.66 克/厘米³，熔点约为 2000°C ，常压下 1720°C 挥发。氧化锌晶体的电子迁移率约为 180 厘米²/伏·秒，禁带宽度 3.2 电子伏。介电常数较小，声衰减小，纵波声速为 6.1×10^5 厘米/秒，横波声速为 2.73×10^5 厘米/秒。

氧化锌晶体可作为超高频延迟介质、声放大器、表面波器件的材料。氧化锌薄膜是压电换能器材料。

氧化锌单晶用水热法生长，氧化锌薄膜用溅射法生长。

钛酸铋

bismuth titanate

钛酸铋 ($\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$) 单晶属单斜晶系，点群对称性为 m ，居里点为 675°C ，居里点以

上为四角晶系。

钛酸铋晶体有较强的自发极化，在 25°C 时自发极化强度为 50×10^{-2} 库仑/米²。室温矫顽电场达 50 千伏/厘米。该晶体具有良好的电光特性，透光波长范围为 $0.45\sim 6$ 微米。加电场改变其自发极化方向，则其双折射等光学性质发生显著变化。用这种晶体制成电光器件，其动作速度与分辨率可达到电视实时活动性显示的要求，对比度可达 20 比 1 以上，且功率消耗很小。所以有可能做成各种光存储器和显示器件。缺点是晶体尺寸不易做得很大，要求激励电压较高。

钛酸铋单晶用熔盐法生长，所得晶体为片状。

硫酸三甘肽

tri-glycine sulfate (TGS)

硫酸三甘肽 $[(\text{NH}_2\cdot\text{CH}_2\text{COOH})_3\cdot\text{H}_2\text{SO}_4]$ 是无色透明的水溶性晶体，化学稳定性好，室温密度为 1.69 克/厘米³。铁电居里点为 49°C 。属单斜晶系，高于居里点时点群对称性为 $\frac{2}{m}$ ，低于居里点时点群对称性为 2 ，铁电性极轴沿单斜系 b 轴（二重轴）方向。在室温时的晶格常数 $a=9.15$ 埃， $b=12.69$ 埃， $c=5.73$ 埃， $\beta=105^\circ 40'$ 。自发极化为 2.6×10^{-8} 库仑/厘米²。介电常数 $\epsilon_{11}/\epsilon_0=8.6$ ， $\epsilon_{22}/\epsilon_0=43$ ， $\epsilon_{33}/\epsilon_0=5.7$ 。

硫酸三甘肽晶体具有良好的热释电性能，热释电系数约为 3×10^{-8} 库仑/厘米²·℃。主要用作快速宽带的红外热释电探测器，这种器件在激光红外技术中有着重要的应用。

用水溶液降温法可培育出大块单晶。掺杂（加入 α 氨基丙酸）的硫酸三甘肽可解决使用中退极化问题。三甘氨酸硫酸盐-三甘氨酸硒酸盐的混晶，可以显著地提高热释电性能和高频性能。

三甘氨酸硫酸盐

tri-glycine sulfate (TGS)

即“硫酸三甘肽”。

四、工 艺

原材料的混合

mixing of raw materials

将多种陶瓷原材料混合均匀的过程,叫做原材料的混合。混合的办法有两种:一为机械混合,常采用球磨(或振动球磨)一为化学混合,常采用化学共沉法。混合的目的是使各种组份均匀混合在一起。

预烧

calcination

将已经混合好的原材料在稍低于成瓷温度下进行反应煅烧的过程称为预烧(或称煅烧)。

预烧的目的:1.使各种原材料进行高温化学反应。2.除掉结晶水及挥发物质以减小收缩率,减小开裂提高致密度。

粉碎

grinding; crushing

将原料粉碎到一定的细度,是电子陶瓷生产中非常重要的过程之一。

粉碎一般分为粗碎、中碎、细磨三个阶段。(1)粗碎:制造陶瓷材料用的天然矿物原料,通常都是块状的,首先经过粗碎。使用的设备有颚式破碎机、双滚压碎机等。(2)中碎:采用轮碾机、锤式破碎机等。(3)细磨:常用球磨机、振磨机、气流粉碎机等。

气流粉碎

fluid energy milling

气流粉碎是陶瓷工业中新方法。它不需采用任何研磨体,直接利用高压的压缩空气或其它气体为能源,通过粉碎腔,对原料进行粉碎。

把原料用加料器送入腔体,被粉碎的料

是靠在腔体内高速旋转、磨削、互相激烈碰撞而得到粉碎的。最终的细度视原料的细度、加料的速度和气体压力而定,一般为0.5~5微米。用这种方法可获得细度均匀的粉料,适于制造要求纯度、细度较高的瓷料。

气流粉碎超细磨效率高,并可以同时同时进行混合、干燥和其它工艺过程,适合于大量生产,但腔体衬底易磨损,辅助设备庞杂,耗电多。

振动磨

vibration milling

振动磨是以振动方式来粉碎物料的,用于对各种瓷料进行细磨和均匀混合,其效率比球磨高。

振磨机由电动机、振动器(偏心轮或凸轮)和料斗等组成。料斗不衬或内衬耐磨橡皮,磨球为钢球或硬质瓷球。工作时,利用偏心轮或凸轮的作用,使支承在弹簧支架上的料斗发生振动。在较高的振动频率下,使磨球与瓷料发生强烈的振动,靠磨球的自动、抛动和彼此撞击,使瓷料得到粉碎。

球磨

ball-milling

是陶瓷材料制造的主要过程之一。球磨的作用是将各种原料进一步细磨和均匀混合,以提高坯料的可塑性,便于成型操作,并促进陶瓷坯料在焙烧过程中的加速反应。

球磨分干磨和湿磨两种。干磨时将各种干燥原料和磨球按一定比例放入球磨机中;湿磨时再加入一定数量的水。

球磨机由球磨筒、金属支架、电动机等组成。大型球磨筒为钢制圆筒,不衬或内衬硬质瓷砖、耐磨橡皮;小型球磨筒为硬质瓷

制成。磨球为钢球或硬质瓷球。

球磨的细磨效率，同球磨机的转速、装填量、原料性质、料球水之比以及球磨时间有关。

助磨剂

auxiliary agents for ball-milling

为提高球磨效率，球磨时所加入的附加材料称为助磨剂。

用于干磨的助磨剂为油酸、亚麻仁酸等；湿磨时用丙醇胺、丁醇胺、三乙醇胺等。优选加入量为 0.5% 左右。

颗粒度测定

determination of the particle size

制瓷过程中，原料的颗粒大小及其组成，直接影响坯件成型、烧结工艺、产品机械强度和电性能。因此，测定陶瓷原料、瓷料粒度及其组成是很重要的。

颗粒度测定的方法有：显微镜法，筛选法，沉降法，吸附法，X 射线法。常用的为筛选法与沉降法。

筛分析法

sieve analysis

筛分析法是用来测定较粗原料和瓷料的粒度及其组成的方法之一。这种方法简单、方便，故在工厂实际生产中广泛应用。

分析时，应用一套孔径大小不同的标准筛，取少量待分析的干料粉或瓷浆，放入套筛的上层进行筛分；然后根据每层筛子上的余料多少，计算粒度及其组成。

对于生产来说，检验原料与瓷料粒度是通过控制筛孔筛的筛余量大小来确定的。

沉降分析法

sedimentation analysis

沉降法是分析较细原料及其组成的一种方法，它以斯托克斯定律为原理。在粘滞性介质中，在重力作用下，球形颗粒沉降的速度与其尺寸有一定的关系。颗粒直径不同，沉降速度不同，即在给定的时间内相同直径

的颗粒都沉降至距液面相同的高度之下。因此，在各种沉降深度测出悬浮颗粒的浓度随时间的变化，即可得出其粒度及组成。

沉降法使用的仪器较多，常用的有沉降天平式、光电比浊式仪器。

新型的自动记录的 X 光沉降比浊仪，测试细粉粒度范围宽，下限小于 0.2 微米，灵敏度与精度高，测试时间短。

除铁

de-ironing

陶瓷原料中的铁质是有害的，它影响产品的白度和电性能（如绝缘强度下降、损耗增加等）。因此，在原料加工过程中，必须除去原矿中夹杂的铁屑和加工过程中混入的铁粉。

常用的除铁法有磁选法和化学酸洗法。

磁选法是利用永久磁铁或电磁铁产生一个较大强度的磁场，原料流经磁场时，其所含铁粉即被磁铁吸住而除去。常用的为磁力分离器，它分干法与湿法两种，干法一般是分离中碎后粉料内的铁屑，而湿法是分离料浆中的铁屑。

原料用钢球磨机细磨过程中，由于钢筒、钢球的磨损，料中混入了大量的细铁粉，用磁选法是不能清除干净的，须采用化学酸洗法，即按一定比例放入盐酸，再经过多次水洗，去掉氯化铁。酸洗后，料中的含铁量用化学分析鉴定，一般应小于万分之几。

压滤

filter-press

去除细磨后瓷浆中多余的水分称压滤。压滤机型式较多，一般为板框式。瓷浆由隔膜泵送入压滤机中两块滤板所夹的滤布之间的压榨室，在压力作用下，水透过滤布的空隙流出，瓷料细粒则留在压榨室内，形成含水 25% 左右的滤饼。

压滤时压力愈大，则滤饼水分愈少。因此，可以通过控制压滤时压力的大小使滤饼

含水量不同,以供各种塑性成型之用。

喷雾干燥

spray drying

把料浆经喷嘴喷成雾状,在高速热风作用下进行干燥称喷雾干燥。它使料浆的压滤、干燥、打粉等多道工序一次完成,是一项新工艺。生产效率高,可节约人力,降低成本。

喷雾干燥所得到的料粉,颗粒大小均匀,形状比较一致,流动性好,可供热压铸和干压成型使用。

喷雾干燥器是热风连续干燥装置,有顺流式、逆流式和混流式几种。

真空练泥

vacuum pugging

塑性成型用的坯料,在使用前应经过真空练泥处理。其目的是消除坯料中的气泡,增加坯料的致密性,提高坯料的可塑性、坯件干燥后和烧成后的机械强度以及产品的电性能。

真空练泥是在真空练泥机上进行的。真空练泥机主要由练泥室、真空室及机头三部分组成。如果在真空练泥机的出口装上挤型口,则可以直接从这里挤出坯件。

陈腐

ageing

陈腐(处理)又称困料,即把坯料放置在保持适当温度与湿度的密闭室内贮放一段时间,通过坯料内有机物质的腐烂与毛细管作用,使坯料内水分分布均匀,以减少层裂和增强可塑性。

在装置瓷生产中,瓷浆在压滤后,一般都进行陈腐处理。

捏练

pugging

为使湿法成型用的坯料致密,水分均匀,减少气孔所进行的操作叫捏练。

捏练是在专用的转盘捏练机或没有真空室的练泥机上进行的。

与真空练泥相比,捏练使坯料水分更加均匀,但减少坯料气孔较差。

打粉

disintegration

把干燥的坯料块打碎成细粉,它是制备干压粉料所必经的过程之一。

打粉常用的打粉机有两种型式:(1)鼠笼式——它的主要部分是两个相反旋转的同心圆栅,坯料块落到旋转的圆栅间即被击碎。(2)刀式——结构简单,主要是在一个可转动的轴上伸出四条臂,每条臂各装一块刀具。工作时,旋转的刀具击碎加入的坯料块,并由旋转产生离心力把料粉吹出机外。

预压

pre-pressing

预压是指干压用的粉料加入粘合剂,在压床上用小于成型时的压力,模压成块,然后打碎,过筛,再将颗粒大小适中的粉料进行干压。所以,预压也是一种再次造粒过程。

预压能排除粉料中一部分空气,增加粉料的致密性。因此,可提高干压坯件的机械强度和电性能。

造粒

granulation

将陶瓷粉粒加适当的粘合剂经预压、打碎、过筛造成一定大小颗粒的过程,叫做造粒。造粒的目的是为了减少压缩比使压制(干压或湿压)的产品减少层裂、提高压制产品的质量。

成型

forming; shaping

将陶瓷坯料采用机械的方法以制成规定的形状和大小的过程叫做成型。成型的方法很多,主要有:(1)压制(干压,湿压),(2)白坯加工,(3)热压铸,(4)注浆,(5)成膜后冲制(成膜的方法有轧膜和流延成膜),(6)挤压,(7)等静压,(8)热压,(9)高温等静压等。

干压

dry pressing

干压是陶瓷坯件成型时广泛采用的一种方法。干压用的粉料一般含有5~8%的粘合剂。通常采用的干压粘合剂有石蜡、聚乙烯醇、阿拉伯树胶、苯胶和水等。

干压成型的特点是：

1. 坯件致密度较高，收缩较小，产品尺寸易控制。
2. 生产效率高，易于自动化，技术易掌握。
3. 不同可塑性的坯料都可用干压法成型。

干压法适用于制造形状不很复杂、尺寸较小的产品。

注浆

slip casting

注浆又叫铸型，适用于制造外形复杂、内孔不规则、尺寸要求不严格或大型的瓷件。注浆成型所用浆料含水30~35%左右，还含有少量电解质。这种方法是把有流动性的浆料注入石膏模内，由于模型吸水而形成坯件。它要求石膏模表面光滑，具有良好的吸水性和一定的机械强度。

注浆法分为实心法注浆和空心法注浆两种。为了加速实心法注浆过程，常采用压力注浆和真空注浆。为了加速空心法注浆过程，常采用离心注浆和电泳注浆。

挤压

extrusion

制造陶瓷坯件中广泛应用的塑性成型方法之一。适用于制造圆柱形、圆管形零件，如各种瓷轴、线圈骨架、瓷管等。

挤压用的坯料，一般均经过陈腐和真空练泥。坯料含水量在20~25%左右。常用的粘合剂有甲基纤维素、糊精、桐油等。挤压成形用的挤压机一般分为立式和卧式两种。

挤压成型的特点是能连续生产，效率较

高，产量较大，而且操作简单。

热压铸

injection moulding

对于装置瓷来说，这是广泛采用的一种成型方法。热压铸用的浆料，是由干瓷粉加入适量的石蜡及表面活性剂，加热熔化而成。浆料经过真空处理可除去浆内的气泡，提高坯体的质量。成型时把浆料倾入压铸机内，利用压缩空气的压力（一般为3~5个大气压）使熔化的浆料充满金属模具。并于冷却和坯件凝固后进行脱模。

热压铸的优点是：

1. 适于成型外形复杂而又不规则的瓷件，坯体尺寸精确、表面光洁度高。
2. 适用于任何瓷料成型，不受瓷料工艺性能限制。
3. 整个工艺过程可完全机械化和自动化。
4. 模具使用寿命长。

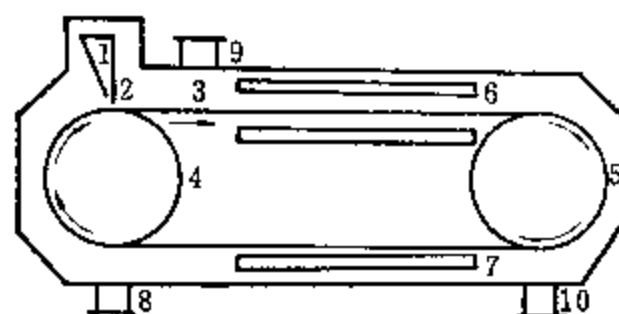
它的缺点是生产周期较长。

流延法薄膜成型

forming method using doctor blading process

这是制造陶瓷薄膜的一项新工艺。

将很细的瓷粉与有机粘合剂溶液以适当比例混合成具有一定粘度的料浆，然后送入流延机（见图）的加料斗内，并从流延嘴流出，随着基带向前运动，流延嘴的前刀把料



流延机结构示意图

1—流延嘴；2—流延嘴前刀；3—基带；4—前转鼓；5—后转鼓；6—上干燥器；7—下干燥器；8—热风进口；9—上部热风出口；10—下部热风出口。

浆刮成一层连续的、表面平整光滑、厚度均匀的薄膜。基带不断地向前移动,把薄膜送进干燥区。通过干燥,粘合剂中的溶剂挥发,薄膜逐渐变硬。当转了一圈到达前转鼓的下方时,可从基带上剥离薄膜。

流延法可以制出厚度为0.05毫米以下的薄膜。流延法为生产大尺寸的基片以及其它小型轻量的微型电子元件创造了条件。

流延法制造的陶瓷薄膜,表面光洁度高,便于生产连续化与自动化,生产效率高。

轧膜

roll forming

轧膜是成型陶瓷薄膜的一种方法。

轧膜前,先把粉料和有机粘合剂均匀混合,然后把初步混合的坯料倒在两个轧辊上反复混练,使粘合剂与粉料分布均匀,溶剂逐渐挥发,坯料不粘轧辊。混练好的坯料经过折叠、倒向等操作反复进行粗轧,使气泡排出,膜层均匀。最后,逐渐缩小轧辊间的距离进行精轧,直到轧出的薄膜达到要求的厚度时为止。轧出膜片的厚度一般在1毫米以下。轧成的薄膜可按照坯件要求的形状和尺寸进行冲剪。

轧膜常用的粘合剂为聚乙烯醇或聚醋酸乙烯酯等有机高分子化合物。

轧膜机的主要部件是两个硬度大,表面光洁度高的轧辊;轧辊之间的距离可以精确地调整,有的轧膜机还可调节轧辊的转速。

轧膜成型的主要优点是工艺简单,轧出薄膜的表面光滑,膜层均匀,质地紧密。但这种成型方法不能连续操作。

轧膜适用于圆片电容器和独石电容器瓷片、厚膜电路基板、晶体管座等。

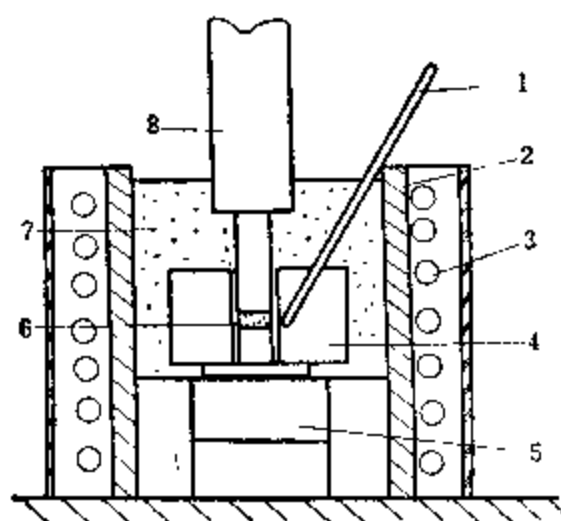
热压

hot pressing

热压是使陶瓷坯料在加压的条件下进行焙烧的一种方法,即成型和焙烧同时进行的方法。

热压的操作方法较常用的有三种。1. 恒压法:在整个升温焙烧过程中都加以预定的最大压力。2. 高温加压法:当达到最高温度时才加预定的最大压力。3. 连续加压法:开始在较低温度下,加较小的压力;当达到最高温度时,加以预定的最大压力;保温一定时间后去掉压力;随后继续升温,保温,冷却。

热压设备(见图)主要由三部分组成。



热压设备示意图

1—测温管; 2—石英绝缘套; 3—高频线圈;
4—模具; 5—氧化铝绝缘垫块; 6—热压粉料;
7—石墨粉; 8—压杆。

1. 加压装置:油压机等。2. 加热装置:电热或高频感应加热装置等。3. 热压模具:除耐热耐压外,要求在高温下不与压制材料发生反应。适于作模具的材料有石墨、不锈钢、纯刚玉、氧化锆等。

热压技术与一般方法比,其优点是:1. 产品的密度高,可达到理论密度的99%以上。而用一般方法制造的产品,达到理论密度的98%也很困难。2. 能控制晶粒生长,使晶粒择优取向。3. 可降低焙烧温度,缩短焙烧时间。4. 可保证产品成分不变和均匀。

它适于制造性能要求高,用其他方法难以制成的产品,已应用于制造压电陶瓷和透明陶瓷等产品。

热压的缺点是工艺较复杂。

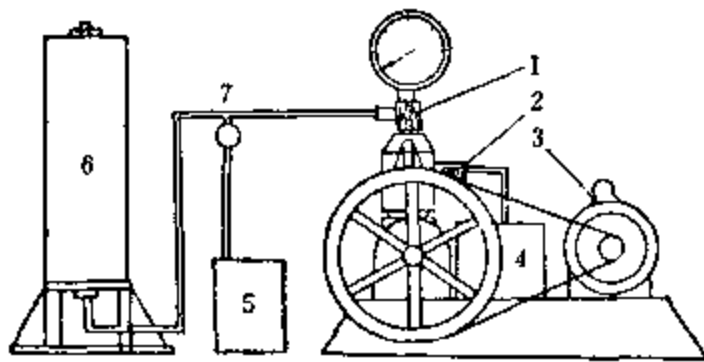
等静压

isostatic pressing

这是利用液体不可压缩和均匀传递压力的特性而制定的一种新成型方法。

成型时把粉料装入有弹性的模具内。密封后,将模具放入高压容器中,并注入液体介质。用高压泵加压,通过液体从各方向传递压力到模具上,使粉料压成紧密的坯件。最后缓慢释放压力,取出模具和坯件。这种方法叫湿法等静压。另外一种方法叫干法等静压,模具不直接与加压的液体接触。

等静压成型常用的模具为橡皮模或塑料模。常用的液体介质有甘油、水(加防锈剂)、刹车油、锭子油等。等静压用的设备由高压泵、高压容器和高压管路系统(阀门和压力表)三部分组成(见图)。



等静压成型设备示意图

1—单向活门; 2—单向活门; 3—机动泵; 4—油
箱; 5—回油容器; 6—高压容器; 7—降压阀。

等静压成型的优点是:

1. 可以压制一般成型方法所不能成型的产品(如形状复杂、细而长的和大尺寸的产品)。
2. 坯件各个方向上的密度均匀,致密度高,产品机电性能好。
3. 模具制造方便,成本较低。
4. 可以不用或少用粘合剂,特别适用于无可塑性的粉料。

等静压成型的缺点是工艺复杂,成型效率不高,湿法等静压难以连续生产。

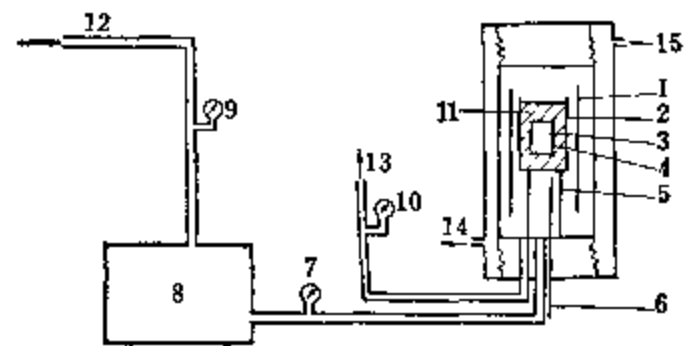
这种方法可用于生产性能要求高的纯氧化物陶瓷、压电陶瓷、高压电容器等。

高温等静压

hot isostatic pressing

这是在等静压成型工艺的基础上发展起来的一种新工艺。这种方法把高温炉装入高压容器内,因而是一种能从各向加压的热压方法。

高温等静压所用设备主要包括(见图):高压容器、高压供气系统、加热系统、冷却系统、气体回收系统及安全系统等。这种方法传递压力的介质不是液体而是气体(氦气或氩气),用压缩机升压。可用金属箔(如软钢、不锈钢、镍、钛、钼等)或耐热玻璃作模具。



高温等静压设备示意图

1—加热器; 2—熔融氧化铝管; 3—压制样器;
4—容器; 5—支持架; 6—热电偶; 7—压力表; 8—
气体压缩机; 9—压力调节器; 10—压力表; 11—
玻璃模具; 12—加压气体进气孔; 13—排气孔;
14—冷却液出口; 15—冷却液进口。

高温等静压的特点是:

1. 瓷件特别均匀致密,物理和机电性能优良,而且各向性能相同。
2. 能精确控制产品尺寸,只需少量加工或不需加工便可使用。
3. 粉料在模具内,在加工放射性或有毒材料时,对人体健康影响较小。
4. 可用于在金属零件上施加陶瓷涂层,也可将不同材料的零件粘合成一个复杂的零件。

这种方法的缺点是设备复杂,投资大,生产周期长。

高温等静压方法可在原子能、火箭、导弹、航空、电子技术以及其它工业部门中用于研制新材料和新产品。

干燥

drying

用挤压、注浆等方法成型的坯件，在焙烧前都需干燥。干燥的目的是除去坯件中的水分。这样可以增加坯件强度，防止焙烧时因水分急速蒸发而引起变形和开裂等缺陷。

干燥的方法有电热干燥、蒸汽加热干燥、高频电流干燥、红外干燥和自然干燥等。

修整

trimming

用热压铸、注浆和挤压等方法成型的坯件，在焙烧前的去除毛刺、修补缺陷和整形等操作，统称修整。

匣钵

sagger

瓷件焙烧过程中，盛放瓷件所用的容器叫匣钵。它由耐火粘土、刚玉砂、铝矾土等原料制作，并经高温烧成。瓷件装入匣钵进行焙烧，可保护瓷件不被污染和不受外力影响而变形。匣钵的软化温度应高于瓷件的焙烧温度，并要求具有较高的机械强度，以及良好的热稳定性、热传导性和高的耐火度。

排蜡

de-waxing

热压铸成型的瓷件，在焙烧前需进行排蜡，以免在焙烧过程因坯件中含蜡过多产生开裂、变形等疵病。须将坯件埋在吸附剂（如氧化铝粉、滑石粉等）中于窑炉内进行排蜡。

排蜡分两种。

（1）部分排蜡：缓慢升温，加热到300℃并保温数小时，冷后取出。此时，坯件中仍含有一部分蜡，并保持一定的机械强度。

（2）全部排蜡：从低温一直加热到高温（900~1200℃）使蜡从坯件中全部排除，并使

坯件具有一定的机械强度。

排蜡的升温曲线，得视坯件的形状和大小而定，这对排蜡后坯件的质量有相当大的影响。

焙烧

sintering; firing

制造陶瓷材料的一个主要过程，又称烧成。焙烧在窑炉中进行。焙烧炉有电炉、真空炉、氢气炉；焙烧窑有倒焰式煤窑、煤气窑、电气隧道窑、油窑等。

焙烧过程一般分为脱水、氧化、成瓷等三个阶段。瓷坯在经过这些阶段时，发生一连串物理的、化学的和物理-化学的变化。在最后一个阶段，瓷坯中发生晶相的结晶、再结晶等作用。某些瓷体产生液相，这些液相填充在固体的晶相之间，使瓷体玻化致密。焙烧过程中的温度、气氛的控制对成瓷质量有很大影响。

烧成

sintering; firing

即“焙烧”。

烧后加工

finishing after firing

烧好的陶瓷制品，其尺寸与表面光洁度尚未达到使用要求时，或要求进行金属化的瓷体，可以根据产品的不同形状和技术要求，进行局部的或全部的加工。

加工的方法分有：切割、外圆磨、内圆磨、端面磨、平面磨、抛光、超声波或激光加工等。此外，为了提高表面研磨精度，可用电子束、离子束加工。

烧后的或研磨加工后的陶瓷产品，需要清除掉表面粘结的垫粉或油污物质。可采取超声波清洗和选用适当的洗液进行清洗。

上釉

glazing

釉是被覆在陶瓷制品上的玻璃态薄层。上釉的主要目的是提高瓷件表面的光洁

度, 增强瓷件的电性能。

上釉的方法是把配好的釉浆, 用涂、浸、喷、网印、静电等方法, 被覆在陶瓷制品的表面, 然后焙烧成釉层。釉浆可直接上在生坯上与坯件一次烧成, 或上在烧好的瓷件上烧第二次。

釉的种类很多, 应注意选用与瓷件的线膨胀系数相适应的釉料, 否则易形成脱釉、剥落等缺陷。

高温釉

high temperature glaze

这种釉的成釉温度较高, 在 1250°C 以上, 又称高火釉。它含有较多的二氧化硅 (SiO_2) 和氧化铝 (Al_2O_3)。它的主要原料是长石、石英、粘土等, 或直接采用二氧化硅和氧化铝等化工原料配制。

高温釉的特点是可与陶瓷制品一起一次烧成。

低温釉

low temperature glaze

这种釉的成釉温度低于 1250°C , 又称低火釉。主要原料是铅丹 (Pb_3O_4)、硼酸 (H_3BO_3)、石英、方解石 (CaCO_3)、粘土等。

低温釉一般先烧成熔块, 然后磨碎, 并加入高岭土等, 故又称熔块釉。它的特点是釉与陶瓷制品不能同时一次烧成, 而要在烧好的瓷件上上釉再烧。

金属化

metallizing

为使陶瓷和金属进行封接或使陶瓷表面具有导电性能, 在陶瓷制品表面被覆一层金属, 这种工艺称为陶瓷金属化。

一般的陶瓷金属化是被银、镀铜、浸锡。要求高的可采用钼、锰、钨、钼、银或金、铂等金属。其工艺可采用网印、喷涂、真空蒸发、溅射、沉积等方法。

极化

polarizing

压电陶瓷在强直流电场作用下, 原来混乱取向的自发极化区域 (电畴) 就沿电场方向有一个择优取向, 撤去电场后陶瓷体仍然保留一定的总体剩余极化。这样, 原来是各向同性的多晶体变为各向异性的多晶体, 从而就使陶瓷体具有了压电性能。这个过程称为压电陶瓷的极化。

压电陶瓷的极化处理是压电陶瓷生产中的一个重要工艺过程。要使不同类型的压电陶瓷充分发挥其最佳的压电性能, 极化条件的确定是很重要的。极化条件主要是指极化电场、极化温度和极化时间。

焰熔法

flame melt method; flame fusion method;
Verneuil's method

焰熔法是一种有几十年工业生产历史的晶体生长方法。它以氢氧焰为加热源, 将极细的氧化物粉末原料以机械振动方式送入焰熔炉的火焰高温区, 原料粉末熔融滴落在籽晶上, 沿籽晶方向生长成单晶。在晶体生长过程, 籽晶以一定速率向下运动, 使晶体顶部处于炉膛的固定位置。

焰熔法适于生长高熔点和熔融状态下不易分解的氧化物晶体, 如红宝石、蓝宝石、尖晶石等。它不仅可以生长尺寸很长的棒状单晶, 还可以生长盘状单晶。

焰熔法的优点是设备简单, 成本较低, 晶体不受炉体和容器 (坩埚) 的限制和沾污。缺点是晶体的宏观均匀性差, 应力大。用这种方法生长的红宝石激光工作物质, 其光学质量不易达到要求, 所以激光晶体的生长已逐渐放弃使用焰熔法。但是, 焰熔法仍是生产钟表和工业轴承用宝石的重要方法。

水热法

hydro-thermal method

水热法是在高温高压下, 利用水溶液的温度差溶解常温常压下难溶于水的物质, 并使之结晶的方法。又称热液法。

水热法生长是在特种钢制的高压釜内进行的。高压釜下部为熔解区,放入原料,中间有一多孔横隔板,上部是挂有定向籽晶片的晶体生长区。在密封情况下加热,釜内压力可上升到1000~2000公斤/厘米²。下部比上部温度高40~50℃,形成一个正温差,较热的溶液上升到较冷区变成过饱和溶液,沿籽晶片析晶。冷溶液下降到高温区,经加热再溶解原料成饱和溶液,再上升到晶体生长区,使晶体逐渐长大。

水热法的优点是可在较低温度下生长高熔点晶体,晶体质量均匀,应力小,位错密度低。缺点是生长周期很长(一个月左右),设备较复杂,生长期间不能观察。

水热法在工业上主要用来生产人造水晶。

助熔剂提拉法

flux pulling technique; Kyropoulos' method

这种晶体生长方法,所用设备和工艺与提拉法相似,不同点是熔体含有助熔剂,提拉过程熔体缓慢降温。它适用于生长熔融状态下容易分解的晶体。其特点是可在较低温度下生长高熔点晶体,但生长速率很慢。

用助熔剂提拉法生长的晶体有钇铁石榴石、钽铌酸钾、铌酸钾和一些卤化物单晶。

熔盐法

molten-salt growth method

熔盐法是模拟天然矿物晶体结晶条件的一种晶体生长方法。

将晶体原料混于适宜的盐类助熔剂中,助熔剂能使晶体原料在远低于其熔点的温度下熔化,按一定程序缓慢降温,由于助熔剂的蒸发和缓慢降温,使熔体过饱和而析出晶体,除去助熔剂即可得到晶莹美丽的晶体。因此,熔盐法也可称为助溶剂法。

熔盐法的优点是工作温度较低,晶面发育完美,晶体应力小,设备操作较简单,缺

点是生长周期很长,晶体成核控制不好易长成大量小晶粒,生长条件控制不好易造成大量包杂,助熔剂大都有毒且具有强腐蚀性。

为获得优质大尺寸的钇铁石榴石和钇铝石榴石,曾对熔盐法进行了一系列技术改进,例如,有在铂坩埚底部进行局部冷却的析晶法、下籽晶提拉法、控制挥发量法和加速坩埚转动技术等。

助熔剂法

flux growth method

即“熔盐法”。

水溶液降温析晶法

solution technique; crystal growth from solution by the temperature-drop method

降温析晶法是从溶液中生长晶体的一种最常用的方法,适用于生长溶解度温度系数为正且较大的水溶性晶体。

这种方法是在育晶容器中盛放一定浓度的母液,在不损失溶剂的情况下缓慢地降低温度,使溶液逐渐处于过饱和状态,溶质就附在品种上析出,生长成单晶。此方法的优点是晶体可以在远低于它的熔点的温度下生长,可以直接观察生长过程,容易生长成大尺寸的优质晶体,并有完整的几何外形。

用降温法生长的水溶性晶体有磷酸二氢钾、磷酸二氢钾、磷酸二氢铵、酒石酸钾钠、硫酸三甘肽等。

水溶液蒸发结晶法

evaporation technique; crystal growth from solution by the evaporation technique

靠溶剂不断蒸发使溶液达到过饱和状态而析出晶体的方法,称为蒸发法。这种方法比较适合于生长溶解度较大而溶解度温度系数又很小的晶体。

方法是将母液置于育晶容器中,维持恒定温度,将母液中水分稳定地蒸发,使晶种

在母液中不断长大。这种方法的优缺点与水溶液降温法相同。

用水溶液蒸发法生长的晶体有碘酸锂, α 碘酸, 硫酸锂 ($\text{Li}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) 等。

晶体光轴的测定

determination of crystal optical axis

光通过晶体不发生双折射的方向叫晶体的光轴。晶体有单光轴晶体和双光轴晶体两类。

用偏光显微镜法测定晶体的光轴。它是利用偏振光的干涉现象, 将晶体置于正交偏光显微镜的载物台上, 会聚偏振光束通过晶体光轴时形成彩色光轴干涉环, 旋转载物台, 倘光轴干涉环不动, 则此方向即为光轴方向。

对于单轴晶体, 其 c 轴晶轴方向即为光轴方向。可以通过光点法 (或称光象法) 或 x 射线法 (包括劳厄法和衍射仪法) 测定晶轴方向, 即可确定单轴晶体的光轴。

光点法是当晶体经腐蚀液腐蚀后, 呈现出许多显示晶体对称性的腐蚀坑, 光垂直照射到这些产生腐蚀坑的面上就会出现显示晶体对称性的光点, 通过分析光点对称性即可确定晶轴。

x 射线劳厄法是使连续的 x 射线射入单晶后产生衍射线, 它能使照相底片感光而形成一系列称为劳厄衍射花样的斑点。通过分析劳厄斑点可以确定晶轴。

x 射线衍射仪法是将试样放在三圆测角头上, 使试样依衍射仪轴及其它两个相互垂直轴转动。根据所用的波长 λ , 晶面间距 d , 由布拉格定律 (即 $2d \sin \theta = n\lambda$) 算出 θ 值。在此衍射位置选择衍射强度最高值, 即可确定晶轴方向。

光学晶体的切割

cutting of optical crystals

光学晶体的切割是晶体加工的第一道工序, 它是把天然或人工生长的晶体切割成所要加工的晶体光学零件的宏观几何尺寸。根

据晶体的不同特点, 其切割方法一般有以下各种。

硬度高的晶体和光学玻璃的切割方法相同, 通常用旋转的薄铁皮刀片加金刚砂切割 (叫做砂切割), 或用镶有金刚石粉的薄铁皮刀片, 用油做冷却剂进行切割 (叫做油切割)。由于刀片形状不同又有外圆切割和内圆切割之分。

具有潮解性的水溶性晶体, 通常采用水浸湿过的线绳或钢丝加金刚砂或旋转的薄砂轮片进行切割。

对于某些容易解理的晶体还可用锋利的刀片沿解理面进行切割。

光学晶体的研磨

grinding of optical crystals

光学晶体用适宜的磨料 (散粒磨料或结合磨料) 磨琢的过程称为研磨。研磨分粗磨和细磨两道工序。

晶体经研磨后其表面微观不平度的算术平均值在 $10 \sim 20$ 微米者称为粗磨。粗磨的目的主要是使光学晶体具有一定的几何尺寸。

晶体经研磨后其表面微观不平度的算术平均值小于 6.3 微米者称为细磨。细磨的目的是使光学晶体接近完工的几何形状和改善表面微观不平度, 为下一道工序抛光打下基础。

光学晶体的抛光

polishing of optical crystals

晶体的抛光是晶体加工中继切割研磨后的一道工序。抛光的目的是消除晶体经过散粒磨料或结合磨料磨琢后形成的高低起伏毛面和交叉裂痕, 使晶体对光线具有良好的透过能力。同时还精确控制晶体零件的几何尺寸。

常用的抛光方法是在抛光机上用抛光膏抛光, 酸类抛光或在绒布上抛光。

定向

orientation

准确确定石英晶体的旋性和轴向,是做好石英谐振器的重要条件。通常采用的定向方法有: X射线定向(或称X光定向)、腐蚀定向和光学定向等三种。

X射线定向

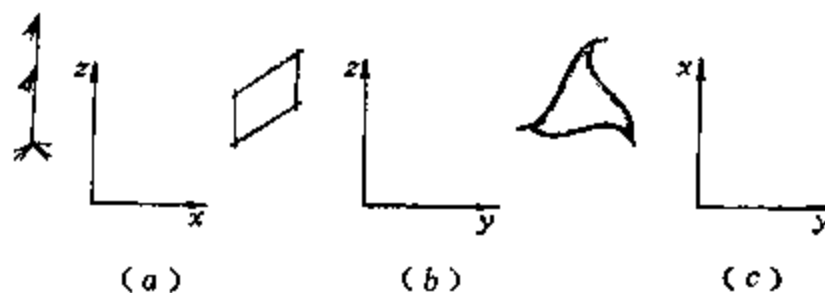
X-ray orientation

X射线的波长很短(等于或小于晶体原子之间的距离),能量很大(约等于可见光的一万倍),入射晶体后要产生衍射。利用衍射来定向,正确可靠,其精度可达 $1'$ 以内,所以X光定向仪已成为晶体定向的关键设备。

腐蚀定向

etching orientation

石英晶体用氢氟酸腐蚀后,用针孔投影器观察星芒图,如图所示。根据星芒图确定旋向、晶轴和切向。



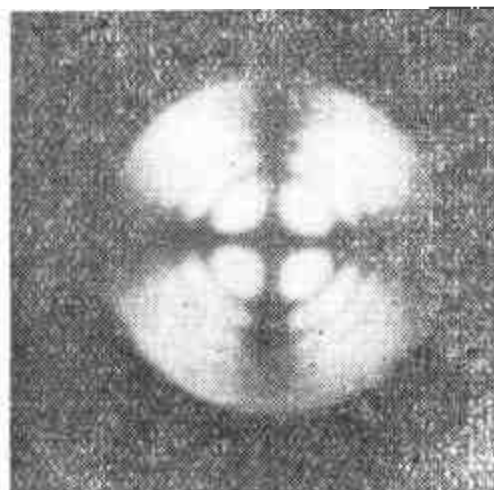
右旋石英上的星芒图

(a) xz 面上星芒图; (b) zy 面上星芒图;
(c) xy 面上星芒图。

光学定向

optical orientation

在正交偏光镜中,光线沿光轴方向通过石英晶体时,产生一个黑十字和各种颜色的圆形光环,如图所示。根据从偏光显微镜中所观察到的黑十字和圆形光环的变化,可确定其轴向和旋向。



光线沿光轴方向通过石英晶体的图形

切割

cutting

石英晶体经过定向确定了方位切角后,即用切割机切成规定的形状和大小。常用的切割方法有内刃切割和外刃切割等两种。

外刃切割

cutting using outside edge of diamond saw

用外刃金刚钻石刀片的外刃部切割,称为外刃切割。这种方法一般适用于切割较大的石英原料,优点是效率高,切割范围广,缺点是刀口损耗大。

内刃切割

cutting using inside edge of diamond saw

用内刃金刚钻石刀片的内刃部切割,称为内刃切割。这种方法一般适用于切割较小的石英原料,优点是刀口损耗小,缺点是切割范围窄。

研磨

lapping

将切割后的石英片,在研磨机上磨成按设计要求的几何尺寸(如方形、棒形、圆形等)或按设计要求的频率值。磨料为碳化硅或氧化铝粉。研磨可分粘板研磨、行星研磨、磨边、磨圆、磨球面等。

行星研磨

lapping using star lapping machine

将石英片放在行星研磨机上下研盘之间的游轮孔中,机内放入磨料,由游轮带动石英片进行双面研磨石英片的厚度,又称游星研磨。

粘板研磨

lapping for cemented plate

将石英片粘贴在平板上,以平板平面为基准,在研磨机上,用磨料单面研磨石英片的厚度。

磨边

edging

将厚度研磨好的石英片粘成叠片，在研磨机上用磨料磨石英片的四个边，使其符合设计所要求的尺寸。

磨圆

rounding

将厚度磨好的石英片粘成叠片，在外圆磨床上用金刚钻石磨轮磨成圆形。

磨球面

contouring

磨成圆形的石英片，在六轴研磨机上或球面磨床上磨成平凸形或双凸形。

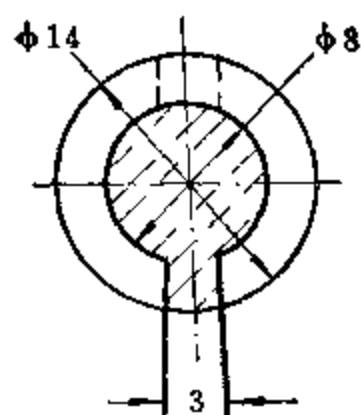


图1 被电极石英片

烧银点

firing silver paste

将银膏点在石英片的节点上，在500℃左右的温度下烘烤，使银点牢固的烧渗在石英片上，如图所示。



烧银点后的石英片

金属层牢化

baking of metal film

石英片被电极后，在一定温度下烘烤，使金属层与石英片结合牢固。

焊电极引线

soldering

抛光

polishing

将石英片粘贴在平板上，在抛光研磨机上用抛光粉精磨石英片的表面，使其透明有光泽。此外，也有采用离子束腐蚀技术抛光的。

被电极

plating

用特制的被电极夹具固定石英片，放入真空镀膜机内，蒸发一层金属薄膜，作为电极。被电极夹具的设计，是按照石英片的尺寸和电极形状用金属材料制成的，如图所示。

有些切型的石英片，还需要在它的节点上烧渗银点，供焊电极引线用。

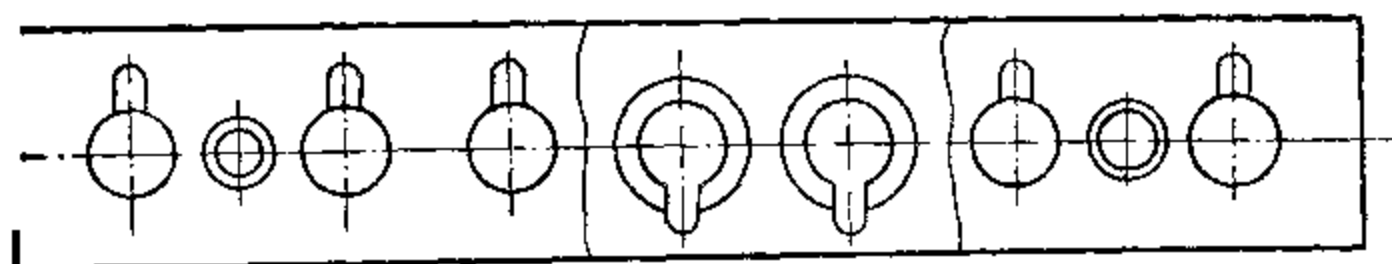
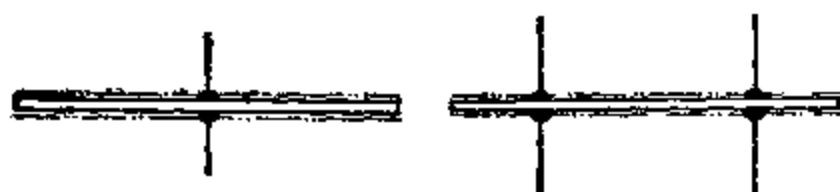


图2 被电极夹具

在石英片的银点上，焊接一根有弹性的细金属丝（直径为0.1~0.2毫米）称为焊电极引线，如图所示。



焊电极引线后的石英振子

调频

frequency adjustment

将石英振子的固有频率调整到规定值称调频或校频。一般有如下五种方法。

(1) 真空蒸发调频：装有支架的石英振子放入真空镀膜机内，增加电极的厚度，将频率调到规定值。

(2) 电镀调频：将石英振子放入电镀液

中,改变电极厚度,使频率调到规定值。

(3) 研磨调频:用研磨方法,改变石英振子的尺寸,将频率调到规定值。这种方法一般适用于 $\alpha + 5^\circ$ 、NT、CT、DT等切型。

(4) 腐蚀调频:将石英振子放入腐蚀液中,腐蚀到规定的频率值。

(5) 激光调频:利用聚焦后的激光束,在晶片电极面上烧掉微量的金属层,使其频率调到规定值。

校频

frequency adjustment

即“调频”。

组装

assembling

石英振子经粗调频后,固定在支架系统上,再进行细调频、封口、排气和测量参数等。这是石英谐振器的装配过程。

封口

sealing

将装有支架的石英振子密封于晶体盒内。玻壳用煤气火头封口,金属盒可采用锡焊、冷压焊、储能焊、电阻焊等封口。

排气

evacuating

为了提高Q值,玻壳石英谐振器封口后,还需要将玻壳内部的气体抽出,并用煤气火头将排气管和玻壳封离,这一过程称为排气。

对于冷压焊产品,则在排气后压封。

测试

testing

石英谐振器主要参数的测试方法有传输法和阻抗计法,如图1和图2所示。

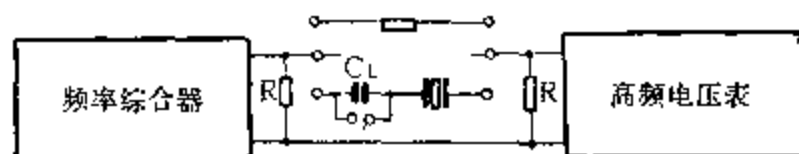


图1 传输法方框图



图2 阻抗计法方框图

采用这两种方法,可测出石英谐振器的串联谐振频率 f_s ,动态电阻 R_1 ,等效串联电阻 R_e ,串联负载电容 C_1 后的串联谐振频率 f_{sl} 。用Q表或电容测试仪,可直接测量静电容 C_0 。 L_1 和 C_1 可通过下式算出:

$$C_1 = 2\Delta f(C_0 + C_1)/f_s$$

$$L_1 = 1/4\pi^2 f_s^2 C_1$$

式中 $\Delta f = f_{sl} - f_{s0}$

在高频范围,还采用精度较高的电桥方法测试,如图3所示。

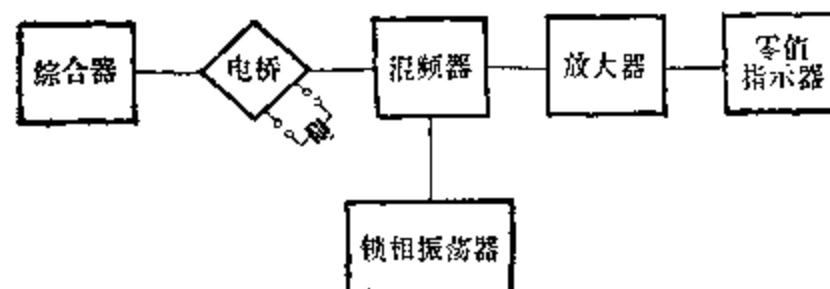


图3 电桥法方框图

五、应 用●

陶瓷滤波器

ceramic filter

以一个或多个压电陶瓷振子为主所组成的滤波器，称为陶瓷滤波器。

陶瓷滤波器的结构大都因振动模式和工作频段的不同而有所差别。通常振子由金属弹性支架固定，或用引线焊接，制成滤波器的芯组，而后封入外壳。陶瓷滤波器的工作频率在几百赫至一、二百兆赫，其相对带宽约为0.3~20%，阻带衰减可高达60分贝以上。陶瓷滤波器的性能一般优于LC滤波器，如插入损耗小，矩形系数好（阻带带宽与通带带宽比小），温度稳定性较好，以及体积小、重量轻等。

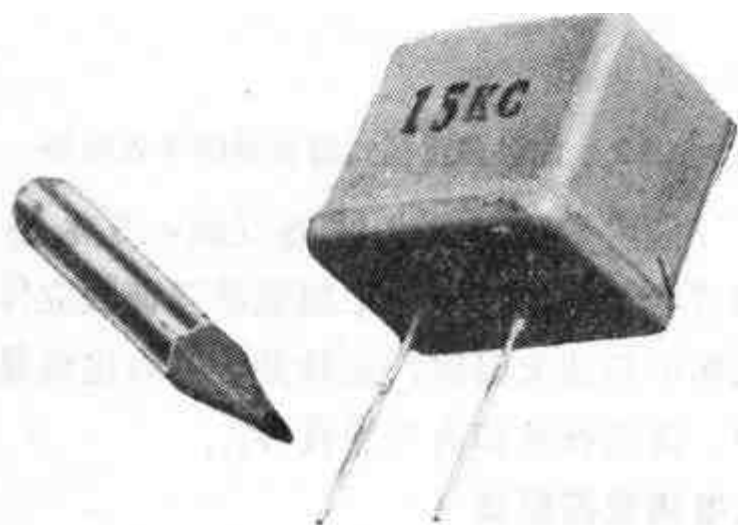
陶瓷滤波器现已在有线电通信、无线电通信、遥测、导航以及仪表测量等许多领域中得到应用。

低频陶瓷滤波器

low frequency ceramic filter

低频陶瓷滤波器一般指在几百赫~200千赫频率范围内工作的陶瓷滤波器（见图）。

这类陶瓷滤波器的振子，大多采用各种弯曲振动模或横向伸缩振动模，其特点是相对带宽较窄，一般在0.3~8%之间。若在网络



低频陶瓷滤波器

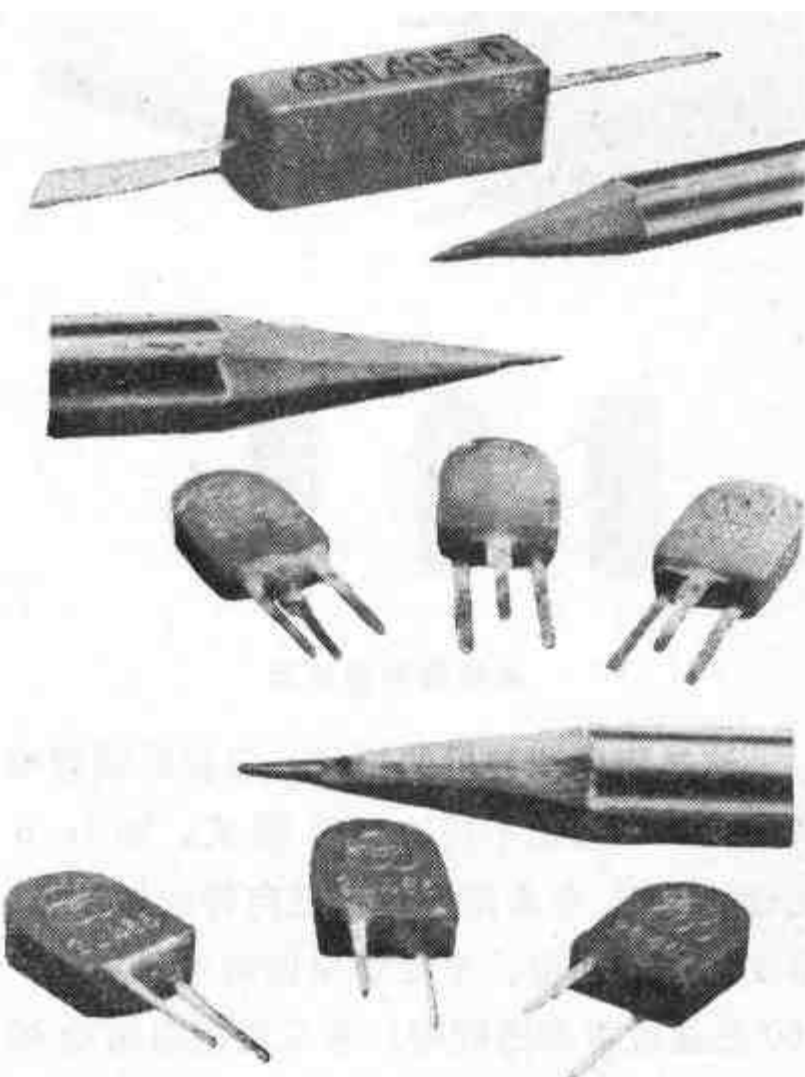
上采取适当措施，通带还可进一步展宽。此外，低频陶瓷滤波器一般工艺性较好，并可获得较为满意的通带特性。

低频陶瓷滤波器主要用于载波和其它特殊的通信技术中。

中频陶瓷滤波器

intermediate frequency ceramic filter

中频陶瓷滤波器一般指在200千赫~1兆赫频率范围内工作的滤波器（见图）。



中频陶瓷滤波器

- 下列各类电子陶瓷和晶体器件所在章节：1.陶瓷电容器——见第六章电阻、电容与电感。2.压电电声、超声、水声器件——分别见第二十九章电声、第三十章超声与第三十一章声纳。3.表面声波和体声波器件——见第三十章超声的微波超声（节）。4.铁电电光器件、非线性光学器件——见第二十八章激光技术。5.热电器件——见第二十七章红外技术。

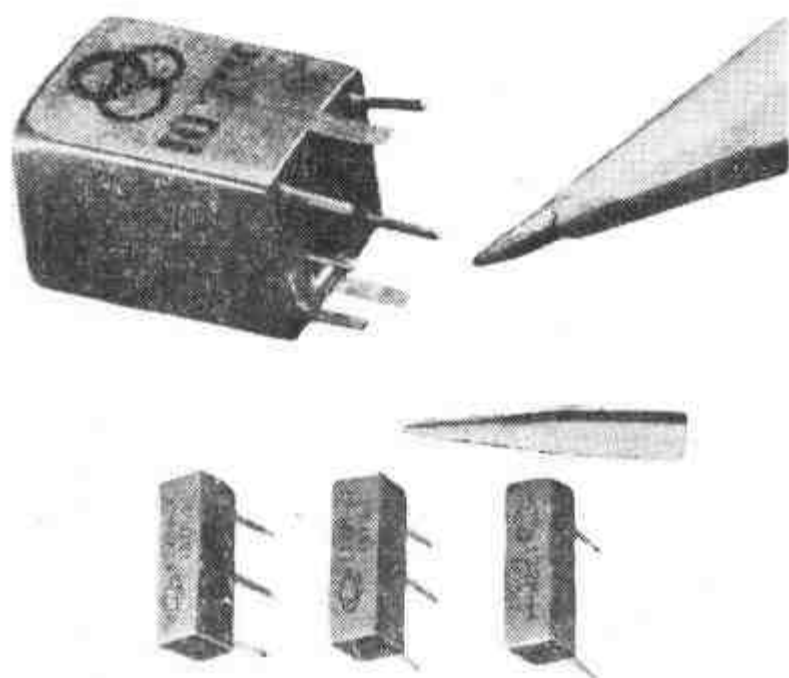
这类陶瓷滤波器的振子，大多采用径向伸缩振动模，其特点是通带可做得较宽，一般在1.5~15%之间。若在网络上采取措施，通带还可适当展宽。此外，中频陶瓷滤波器工艺性好，同时还可得到较为满意的通带特性。

中频陶瓷滤波器主要用于收音机和通信设备中。

高频陶瓷滤波器

high frequency ceramic filter

高频陶瓷滤波器一般指在1兆赫频率以上工作的陶瓷滤波器（见图）。



高频陶瓷滤波器

这类陶瓷滤波器的振子，根据所需频率和带宽，可选用不同的振动模式。如1~6兆赫的频率，多采用环电极径向伸缩振动模、厚度伸缩振动模、厚度切变振动模等；3~100兆赫或更高的频率，多采用能阱振动模或多重振动模等。这些高频滤波器，通带宽度有较大的变化范围，结构形式也很多。

高频陶瓷滤波器可用在无线电通信、遥测、导航和仪表测量等方面。

多重模式滤波器

multi-vibration-mode filter

利用两种以上振动模式的振子制作的滤波器，称为多重模式滤波器。

能阱多重模式滤波器的原理如图1所示。图中1为输入电极，3为输出电极，两电极间的实线表示同相位的振动，称为对称模式；而虚线为输入输出电极以互为相反的相位振动，称为斜对称模式。这种振子的等效电路相当于由两个串联谐振电路、一个相位倒相变压器和输入、输出端各自的寄生电容所组成。这种等效电路可变成所谓格式滤波器的形式（见图2）。如果适当选配谐振和反谐振频率的间隔，则可得到较好的单节滤波器的通带特性，其相对带宽约为1~5%。此外，也可做成在一个瓷片上有两组的二元件型，将它组合后制成的滤波器阻带衰减较高。

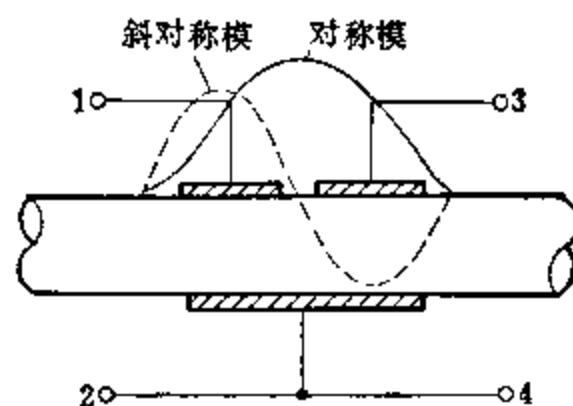


图1 能阱多重模式滤波器的原理示意图

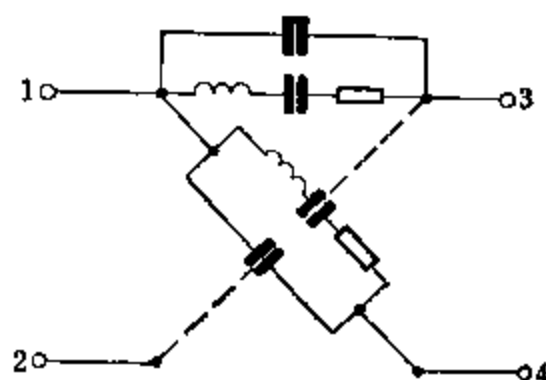


图2 能阱多重模式滤波器的等效电路

能阱多重模式滤波器（如4.5兆赫与10.7兆赫）已可用于中频载波及调频立体声调谐中频放大回路，这种滤波器的优点是小型、高选择性和高可靠性等。

压电陶瓷鉴频器

piezoelectric ceramic discriminator

压电陶瓷振子在谐振频率附近, 其阻抗随频率成较大的线性变化。利用压电陶瓷振子这一特性做成的鉴频器件称为压电陶瓷鉴频器。

图 1 是压电陶瓷鉴频器的常用电路之一, 图 2 是鉴频器的输出特性。此类鉴频器的检波中心频率和带宽 (即线性范围) 与陶瓷振子的振动模式、尺寸和所用材料有很大关系。

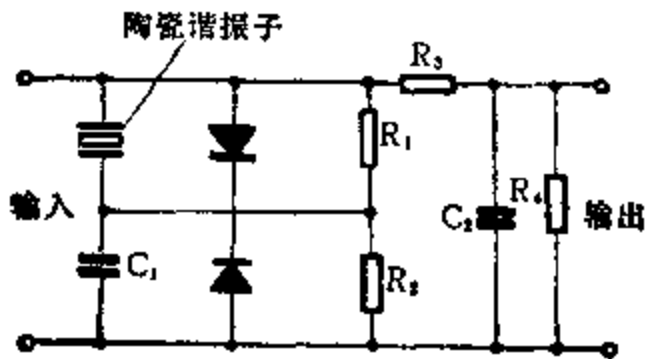


图 1 陶瓷鉴频器的一种常用电路

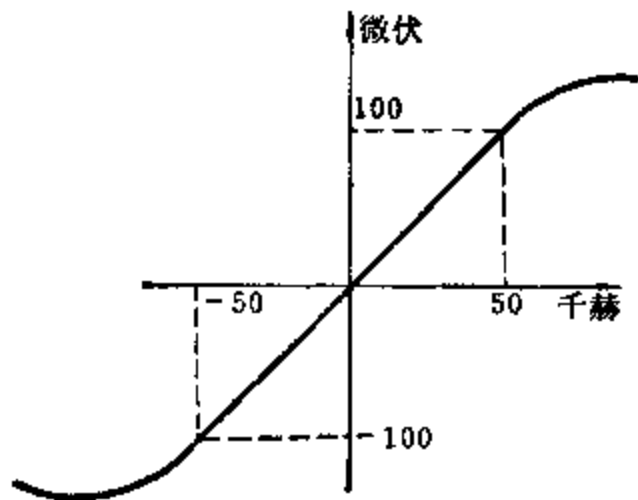


图 2 鉴频器输出特性

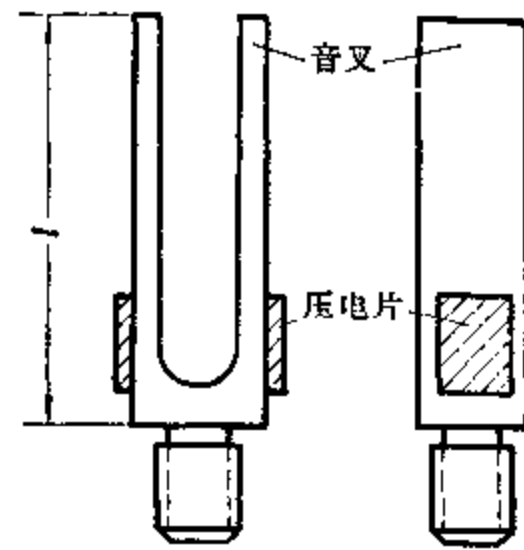
陶瓷鉴频器的优点是体积小和制作容易等, 其缺点是线性范围不够宽, 中心频率的温度稳定性还不够理想。

压电音叉

piezoelectric tuning fork

利用压电陶瓷换能器驱动叉臂作弯曲振动的音叉, 称为压电音叉。图示为压电音叉的一般结构。音叉的每个臂可以看作是一个具有矩形断面的悬臂梁。

音叉常用材料是镍铬钛系恒弹性合金, 压电片可用锆钛酸铅陶瓷。它的一片将电能



压电音叉

转换成机械能驱使音叉作弯曲振动, 另一片又将机械能转换成电能输出。因此, 音叉可用作滤波器或用于振荡器。压电音叉适用频率范围为 100 赫~6 千赫。用压电音叉作振荡元件时, 其频率准确度可做得很高, 如频率范围为 382.5~847.5 赫的音叉, 其准确度可达 ± 0.1 赫。温度稳定性主要取决于音叉材料的稳定性, 因为压电片的体积与音叉比较相差很远, 稳定性通常可做到 $1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, 压电音叉的机械品质因数 Q_m 值也较高。

与电磁驱动的音叉相比, 压电音叉的优点是结构简单, 耐冲击, 易于小型化, 以及不要求音叉材料一定具有磁性。由于它可做得很小, 近年来还被用于制作音叉手表等新器件。

压电陶瓷气体火花塞

piezoelectric ceramic gas-sparking plug

是利用压电元件受到冲击力产生高电压, 该电压通过间隙放电, 产生火花, 导致气体引燃的装置。制作这种元件的压电陶瓷要求具有较大的压电电压系数 g 和尽可能高的介电常数 ϵ 。同时还要求它具有较好的机械强度和耐冲击的稳定性。

压电陶瓷气体火花塞除在民用装置中用作点火元件外, 在军用装置中 (如弹药的引

信等) 也得到较多的应用。

压电打火机

piezo electric lighter

用压电陶瓷做成的打火机, 称压电打火机, 又称电子打火机。其工作原理和基本要求与“压电陶瓷气体火花塞”同。

压电压力计

piezoelectric pressure meter

用压电材料制成测定各种压力的器件称作压电压力计。所测定的力根据所用压电陶瓷的性能及其振动模式进行计算。在沿压电陶瓷片的极化轴方向的整个面上施加均匀力, 则开路输出端便产生电压。力 F 与电压 V 的关系可由下式得出:

$$F = VA/gt \text{ (牛顿)}$$

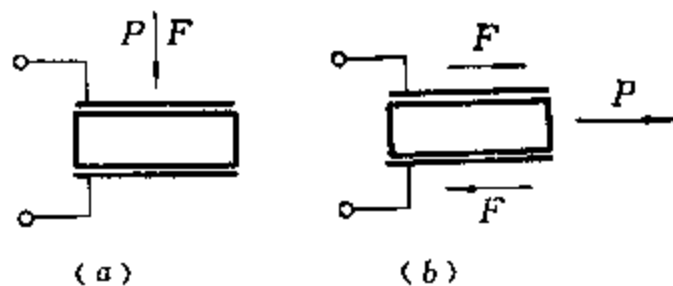
式中 A ——瓷片的面积(平方米);

t ——瓷片的厚度(米);

V ——电压(伏);

g ——压电电压常数(伏·米/牛顿)。

根据外力与极化轴方向的不同, 这种压力计可分为两种形式。一种是压力与极化轴相平行, 这时利用压电片的厚度振动模, 系数为 g_{33} (图 a); 另一种形式是利用压电片的切变振动模, 其压电电压系数为 g_{16} (图 b)。



压电压力计

压电压力计可用来测定各种压力, 如车辆通过时枕木受到的压力、油浸断路器的油压变化等较大的压力, 以至于通信用继电器的接点压力、人体脉搏等微小压力。利用切变模制作的压力计可测量摩擦力或摩擦损耗等。此外, 可以利用压电材料的电致伸缩效应, 通过油等媒质将压力转换成静水压, 再行测定。

压电厚度计

piezoelectric thickness gauge

利用压电振子振动时所产生的超声波来测定物体厚度的装置, 称为压电厚度计。

压电厚度计的工作原理是, 以压电振子产生的波长为 λ 的超声波辐射至被测物体, 当被测物体产生谐振时, 它的厚度 $t = mv/2f_m$ 。其中 V 为声速, f_m 为 m 次谐振频率, m 为谐振次数, $m = f_m/(f_{m+1} - f_m)$ 。

因此, 若知道被测物体声速 v 和任意两个相邻谐振频率, 即可计算出被测物体的厚度。

陶瓷变压器

ceramic transformer

陶瓷变压器是由压电陶瓷材料制成的具有电压变换特性的器件。

压电陶瓷变压器的结构、种类很多, 例如按振动模式可分为: 横向振动型、纵向振动型、横-纵向振动型、径向振动型和弯曲振动型等。其基本原理是利用材料的压电效应进行机电能量的二次变换, 在谐振频率上获得升(降)压输出。一般作为升压的横-纵向型变压器, 因其输出阻抗高, 又有高的升压比, 故实用意义较大。陶瓷变压器的形状和等效电路见图 1(a)、(b)和图 2。

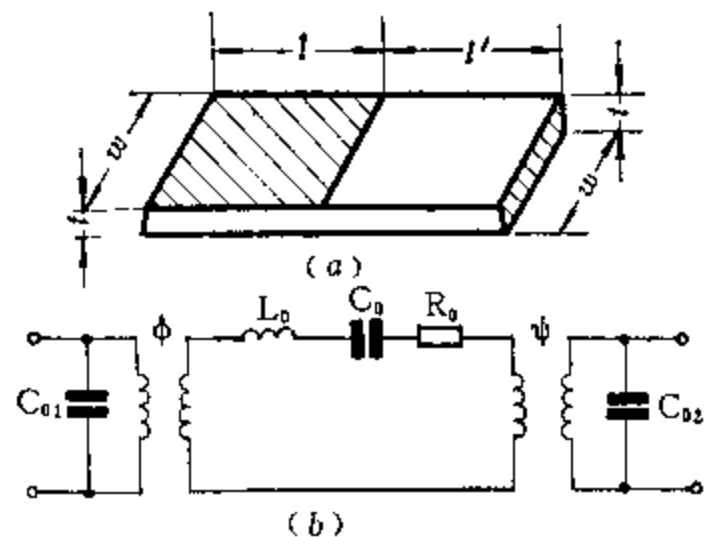


图1 横-纵向型陶瓷变压器

图 1(b)中 C_{01} 、 C_{02} 分别为驱动部分和发电部分的夹板电容; L_0 、 $1/C_0$ 、 R_0 是靠近谐振频率的机械电路的集中参数, 它们分别表示陶瓷变压器在谐振点附近的等效质量、

弹性强度和机械阻尼; ϕ 和 ψ 假设为理想变压器初级端和次级端的变压比, 该变压比分别与材料的压电常数(d_{31} 、 d_{33})、弹性常数(Y^E)及变压器的尺寸有关。其关系式为

$$\phi = J_{31} Y^E w / 2 \quad \psi = d_{33} Y^E w t / 2l$$

开路时的升压比的计算式为

$$\text{升压比} = \frac{4}{\pi^2} Q_m K_{31} K_{33} \frac{1}{t} \frac{C_{02}}{C_{02} + C}$$

其中 Q_m 为机械品质因数; K_{31} 和 K_{33} 分别为横向与纵向机电耦合系数; C 为接在负载端的等效分布容量。

此外, 在陶瓷变压器输出端不同长度的位置上, 被覆环状电极抽头, 可以得到多种电压输出。

对于尺寸为 $70 \times 19 \times 3.5$ 毫米的瓷片, 其半波模的谐振频率约为 24 千赫, 全波模的谐振频率约为 48 千赫, 单片的输出功率为几瓦至十几瓦, 升压比为数十至数百倍。为了增加输出功率, 也可将两片或多片变压器按同极性并联, 发电端的安全场强 $E_{\text{安}} = 60 \sim 80$ 伏/毫米。

陶瓷变压器具有体积小、重量轻、无磁场干扰、不会烧毁, 以及简单、适于批量生产等优点, 但不足之处是它的谐振频率和变压比与负载的大小及温度等因素有关, 因此在较宽的温度范围内使用时, 必须要有同步的激励源方能获得满意的效果。

陶瓷变压器可用作阻抗和电压的变换, 特别对小电流的高压变换较为适宜。

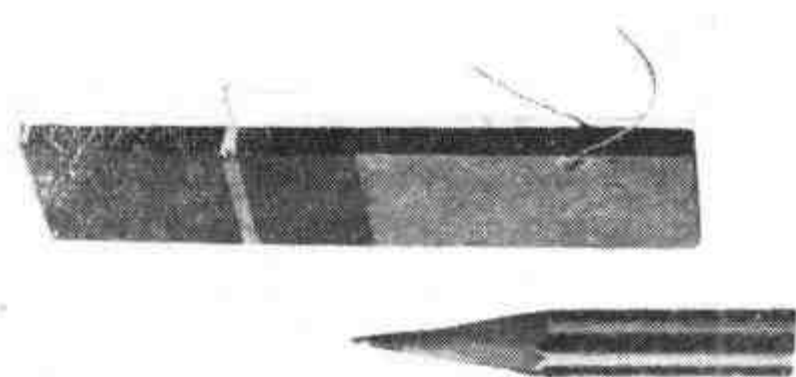


图2 横-纵向型陶瓷变压器外形图

陶瓷直流电源变换器

ceramic converter for DC voltage source

主要通过陶瓷变压器的升压作用将直流低压电源变换成直流高压输出的装置, 称为陶瓷直流电源变换器。

它的工作原理如图1所示。它是将陶瓷

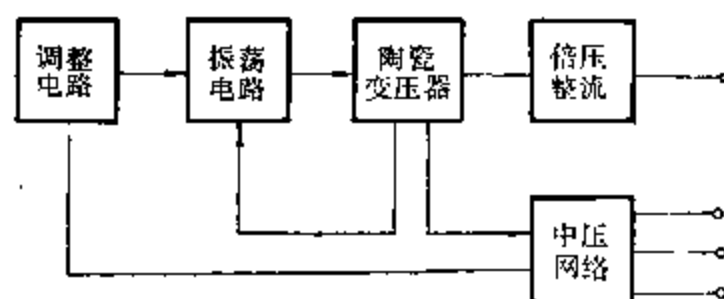


图1 陶瓷直流电源变换器的工作原理

变压器插入反馈电路中, 利用其谐振时阻抗最小, 即反馈量最大的特点, 使得振荡电路跟随陶瓷变压器的谐振频率而工作。为得到直流高压和较高的传输效率, 在陶瓷变压器的输出端, 采用倍压整流电路以获得高而且稳定的直流电压输出。外形如图2所示。

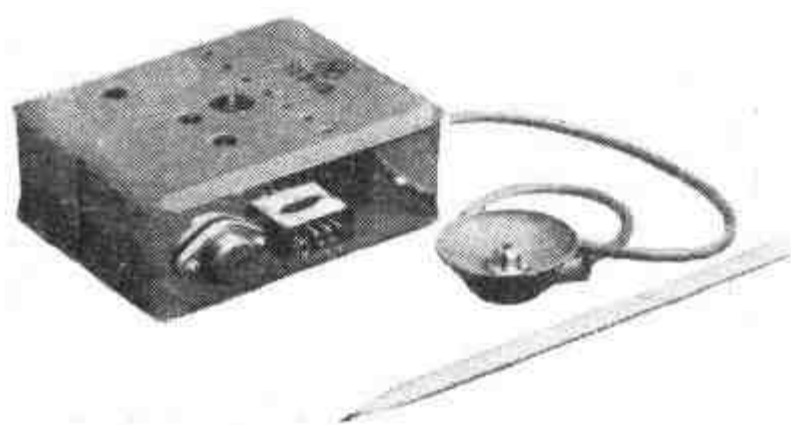
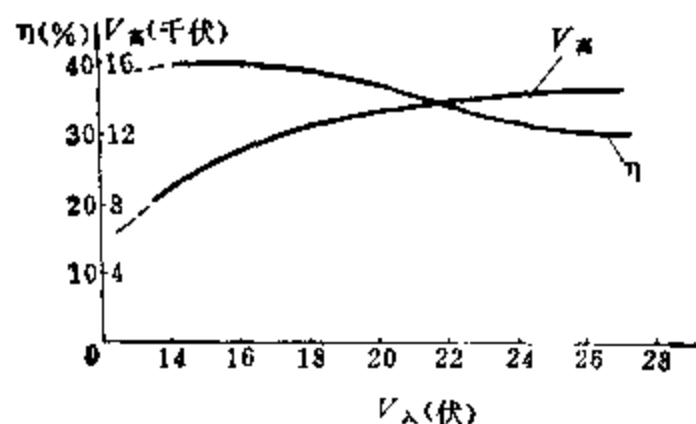


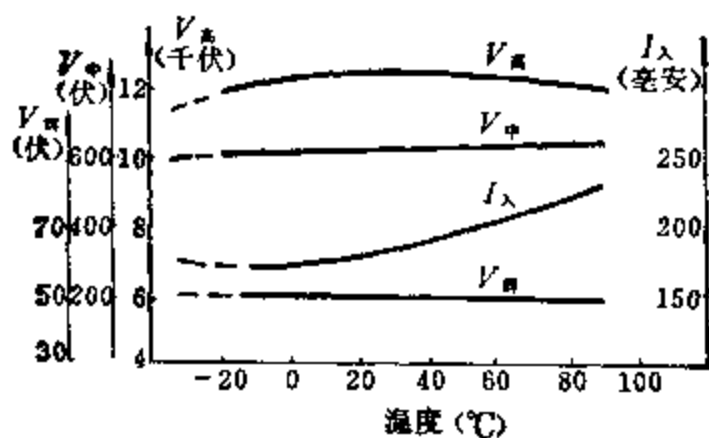
图2 陶瓷直流变换器

变换器的主要特性如图3所示。

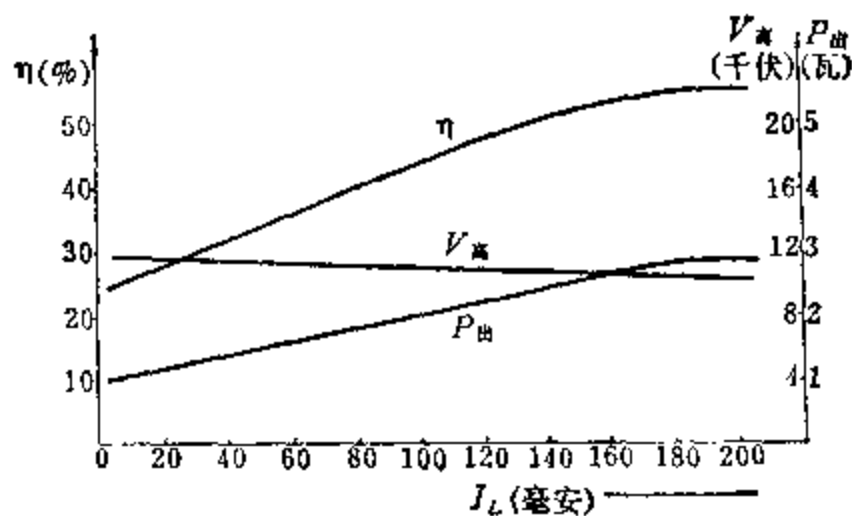
陶瓷直流变换器一般均有几瓦以上的输出功率, 因其变换比较高(数百倍), 且具有体积小、重量轻、又无磁场干扰、使用安装方便等优点, 因此对需用高压小电流的仪器和设备较为适宜。如雷达、计算机中显示部分所用的高、中压电源、其它工业和民用电气设备中需要的高压小电流电源均可使用。



(a) 输入输出特性



(b) 温度特性



(c) 负载特性

图 3 陶瓷直流变换器的主要特性

压电角速度传感器

piezoelectric angular rate sensor

压电角速度传感器系根据哥氏力原理设计而成，其工作原理如图 1～图 3 所示。

图 1 所示的传感器由一根截面近似为正方形的金属梁和粘在梁上的四片压电换能器组成。梁通常采用恒弹性合金材料 (Ni_{42} 、 Ni_{43})，压电换能器可用锆钛酸铅陶瓷、石

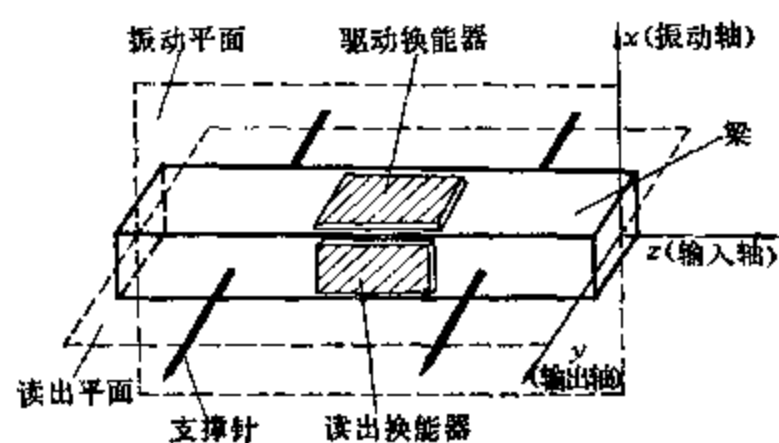


图 1 传感器模型

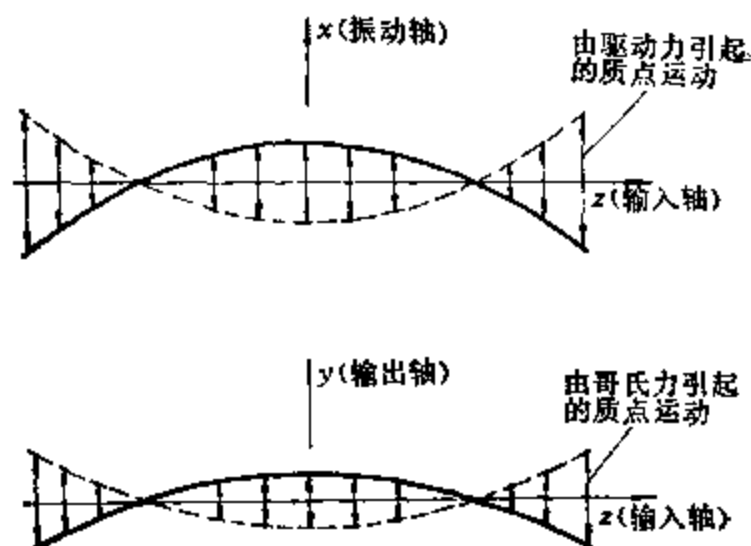


图 2 梁振动包络

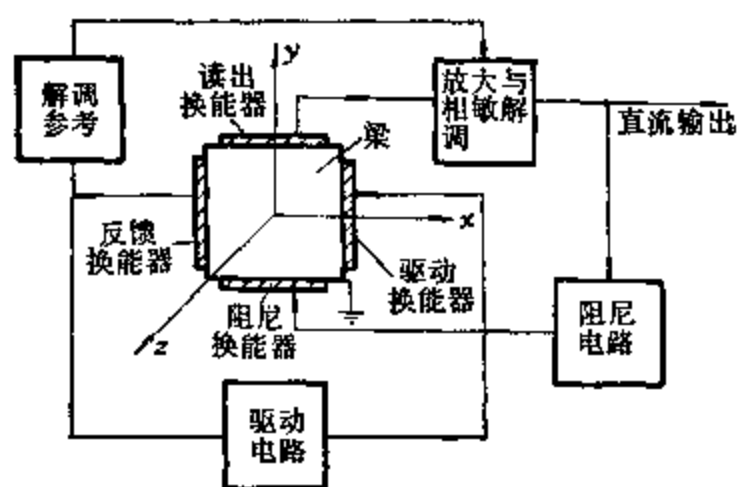


图 3 传感器电路方框图

英、铌酸锂等压电材料制成，但大多采用压电陶瓷。梁在其振动节点处穿针支撑。

设 x 、 y 、 z 为三根互相垂直的轴，其设置如图 1 所示。如将振梁与电路相连接 (图 3)，则梁由驱动电路驱动沿 x 平面作弯曲振动，振动质点的速度为 \vec{v}_x 且垂直于 z 轴。当 z 轴没有角速度 ω_z 输入，而梁又是严格平衡的，则读出换能器上没有输出。设有一 ω_z 输入，则有哥氏力 \vec{F}_c 产生， $\vec{F}_c =$

$-m(2\vec{\omega}_x \times \vec{v}_x)$ 。式中 m 为梁的质量。 \vec{F}_x 引起梁沿 y 平面作弯曲振动, 读出换能器把该振动转换成电信号检出。通过相敏解调后以直流形式输出, 当 $\vec{\omega}_x$ 反向时, 则直流输出也反向。位于读出换能器对面的阻尼换能器, 用来获得附加阻尼, 以防止有振荡角速率输入时电路发生振荡。

这种传感器, 由于没有高速旋转部分, 与普通速率陀螺相比, 它的相对优点是寿命长, 功耗小, 动态范围宽, 体积小, 重量轻等。因此, 可望用来代替目前惯性制导系统中所用的普通速率陀螺。

压电陀螺

piezoelectric gyroscope

即“压电角速度传感器”。

压电加速度计

piezoelectric accelerometer

用压电振子制成的加速度计称为压电加速度计。这种加速度计是利用压电材料的压电效应来工作的。在线性弹性范围内, 压电陶瓷在外力作用下所产生的电荷正比于所施加的力。压电加速度计的工作原理如图 1 所示。

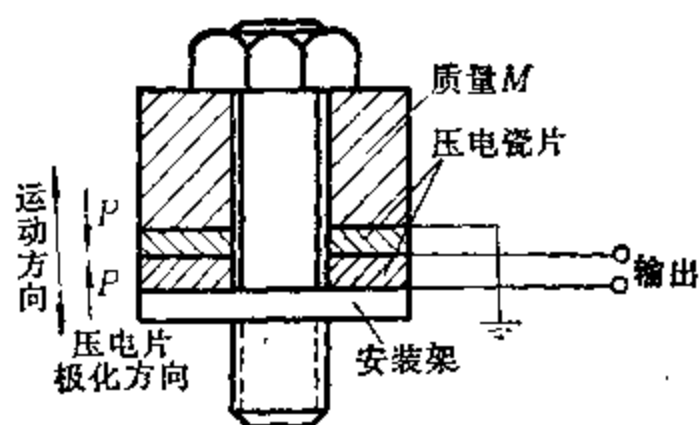


图1 压缩型压电加速度计

设压电陶瓷片的质量为 m , 厚度为 t , 面积为 A , 金属块的质量为 M , 与压电陶瓷片并联的大电容为 C (包括本身静电容), 压电元件的输出开路电压为 V_0 , 短路电压为 V_s , 则加速度 a 与 V_0, V_s 的关系为:

$$a = \frac{V_0 A}{g_{33} t \left(M + \frac{m}{2} \right)}$$

或

$$a = -\frac{V_s C}{d_{33} \left(M + \frac{m}{2} \right)}$$

因为 A, t, M, m 和 g_{33}, d_{33}, C 等均为已知, 故只要测出 V_0 或 V_s 便可得出加速度 (a)。

加有质量 m 的压电片是一个谐振系统, 所以加速度计的灵敏度 (单位重力加速度 g 所产生的输出电压) 与工作频率有关, 一般规定加速度计应在远低于它的谐振频率 f_r 下工作, 通常规定为 $0.3f_r$ 。图 2 是加速度计的灵敏度频率特性。加速度计的工作温度与压电材料的居里温度有关, 通常比居里温度低 $30 \sim 40^\circ\text{C}$ 。

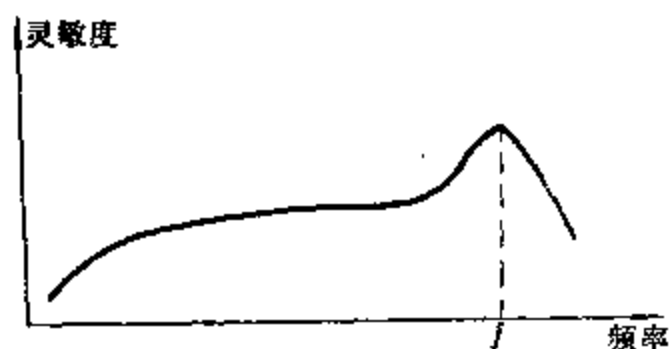


图2 加速计灵敏度频率特性

为了获得不同的工作频率和灵敏度, 压电加速度计有多种结构。图 3 是悬臂梁式的弯曲型加速度计, 其灵敏度可达 150 毫伏/克。典型的压缩型加速度计, 其灵敏度可达 70 毫伏/克, 最高工作温度达 260°C , 工作频率

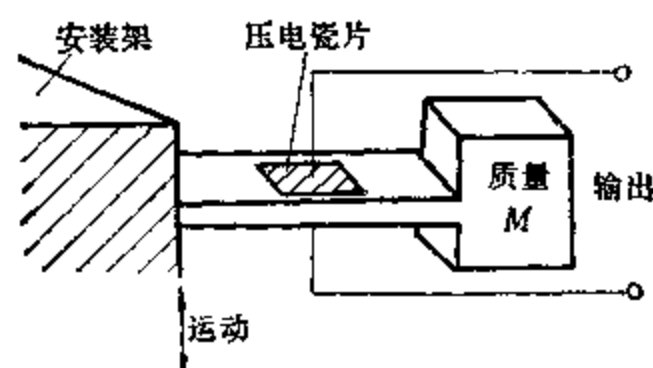


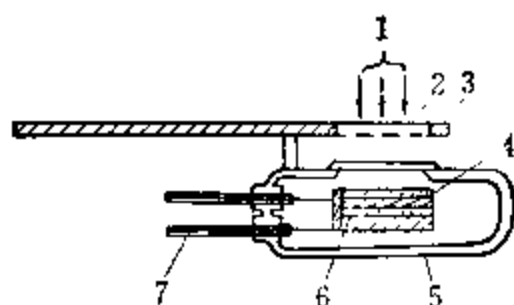
图3 弯曲型压电加速度计

范围可从几赫到 25 千赫, 动态测量范围可从 $10^{-3} \sim 10^3 g$ 。这种加速度计如与积分电路相结合, 则可求得运动时的速度。压电加速度计已应用于空间技术、环境试验和计测等方面。

压电高温计

piezoelectric pyrometer

压电高温计是利用压电体受热辐射时释放电荷的热释电效应来测量辐射体温度的计量装置(见图)。



压电高温计示意图

1—辐射线; 2—窗; 3—断续开关板; 4—砭; 5—真空玻璃管; 6—压电体; 7—导线。

用辐射热断续照射压电体, 使其交替加热、冷却而产生温度变化, 致使压电体的电极产生电荷变化, 测定压电体两电极间的电位差 ΔV 即可求出温度, 其关系式为

$$\Delta V \propto b\beta \frac{1}{\epsilon} \Delta T$$

式中 b 表示压电体的厚度(米), ϵ 为介电常数(法/米), ΔT 为由辐射热所引起的温度变化($^{\circ}\text{C}$), β 为热释电系数(库/米 $^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$)。

当压电体材料和结构已确定, 则 b, β, ϵ 和交替加热间隔时间均为已知, 则关系式可写为:

$$\Delta V \propto \Delta T$$

$$\Delta V = k \Delta T \quad (k \text{ 为常数})$$

另一种计算方法为:

$$\begin{aligned} \Delta V &= AR_1 \frac{dP_s}{dt} = AR_1 \frac{dP_s}{dT} \frac{dT}{dt} \\ &= AR_1 \beta \frac{dT}{dt} \text{ (微伏)} \end{aligned}$$

式中 A ——压电体面积(厘米 2);

R_1 ——负载电阻(欧);

β ——热释系数(10^{-6} 库/厘米 $^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$);

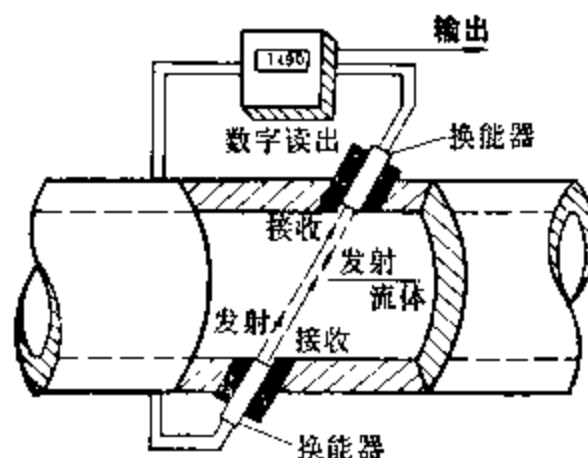
$\frac{dT}{dt}$ ——温度变化的速率($\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{秒}}$)。

压电流量计

piezoelectric flowmeter

用压电振子振动时所发出的超声波来测定液体流量的装置称为压电流量计。

压电流量计的工作原理(见图)是沿液体流动方向设置保持一定间隔的两个超声波振子, 一个作发送信号用, 另一个作接收信号用。每隔一短时间($1/100$ 秒)两振子的收发作用互换。由于超声波在顺流和逆流方向传播有微小的时间差, 在顺流和逆流情况下发送和接收时会出现“位相差”, 而位相差与流速成比例。因此, 只要指示出位相差, 即可测出流速。



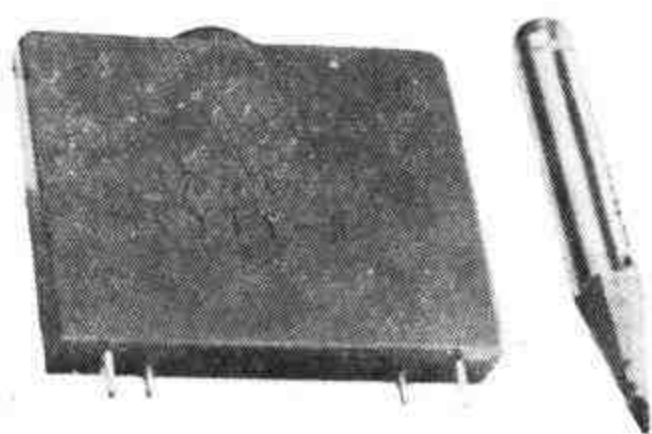
压电流量计

压电陶瓷延迟线

piezoelectric ceramic delay line

指用压电陶瓷换能器制作的延迟线(见图)。





压电陶瓷延迟线

石英谐振器

quartz resonator

石英谐振器由石英片、电极、支架和外壳等构成,是重要的电子元件。

随着无线电通信的应用日益广泛,无线电频谱的容量就愈感紧张。为在有限的频谱内容纳更多的通信频段,就需要对频率控制和频率选择提出更高的要求。过去,振荡器中常用的频率控制元件是 LC 调谐电路,其主要缺点是 Q 值低和频率稳定性差。石英谐振器的主要优点,是 Q 值高(从几十万到几百万),频率稳定性好(比 LC 高两个数量级以上),所以目前广泛应用于通信、导航、广

播、时间和频率标准,以及彩色电视、石英手表、小型对讲机等电子产品中。

石英谐振器是利用 α 石英晶体的压电效应设计制成。

由于石英晶体不是在任何方向上都具有压电效应;石英谐振器的频率随温度的变化,主要取决于石英片的切型;加工工艺和结构设计等对谐振器的性能影响很大。

所以,不是从石英晶体上任意切下一个石英片,就可制成合乎要求的谐振器。经过人们长时间的实践,已经发现了不少好的切型、好的结构设计和加工工艺,并且能大量生产出高质量的谐振器。但是,如何设计制造频率稳定性更好的石英谐振器,仍是当前的重要课题。

石英谐振器是在谐振状态下进行工作的,其电气特性与谐振状态有关,而谐振状态又与石英片的振动模式有关。现代电子技术要求石英谐振器往更高的频率方面发展。如何设计制造频率更高的石英谐振器,也是当前的重要课题。

石英谐振器的分类如下:

1. 按精度分
 - (1) 高精密石英谐振器,频率稳定度高于 $10^{-9}/\text{天}$
 - (2) 中精密石英谐振器,频率稳定度介于 $10^{-7} \sim 10^{-9}/\text{天}$ 之间
 - (3) 通用石英谐振器,频率稳定度低于 $10^{-7}/\text{天}$
2. 按支架系统分
 - (1) 焊线式石英谐振器
 - (2) 夹簧式石英谐振器
 - (3) 捆扎式石英谐振器
3. 按晶体盒分
 - (1) 胶木盒石英谐振器
 - (2) 玻壳石英谐振器
 - (3) 金属盒石英谐振器
4. 按用途分
 - (1) 用于振荡器中的石英谐振器,简称振荡晶体
 - (2) 用于滤波器中的石英谐振器,简称滤波晶体
 - (3) 用于测温、测压和测薄膜厚度的石英谐振器等

石英晶体滤波器

quartz crystal filter

由石英谐振器和电感、电容等元件组成的滤波器称为石英晶体滤波器。

石英晶体滤波器可以做成带通和带阻等类型,以带通的应用最为广泛。石英晶体滤波器的最大相对带宽主要决定于石英谐振器

的电容比 C_0/C_1 , 它的最大相对带宽一般不

- 用来保护石英振子和支架系统的外盒,称为晶体盒。最早出现的是胶木盒,由于其密封性太差,已日趋淘汰。玻壳一般用于精密度较高的石英谐振器。金属盒又可分为锡封金属盒和冷压焊金属盒,锡封金属盒用于通用石英谐振器;冷压焊金属盒用于精密度较高的石英谐振器。冷压焊金属盒的性能和玻壳差不多,并有体积小和机械强度高的优点。

超过0.4%。采用展宽措施,最大可达7~10%,但性能下降。晶体滤波器可运用的频率范围很宽,从1千赫到200兆赫都能生产。它的工作原理和设计方法都和LC滤波器相同。主要优点是插入损耗小,稳定性高和选择性好。这种滤波器广泛用于无线电通信设备、载波机、单边带机、多路通信系统以及雷达、导航、测距设备和各种电子仪器中。

单片石英晶体滤波器

monolithic quartz crystal filter

只用一块石英片,不需外加其它元件做成的滤波器称为单片石英晶体滤波器。高频单片晶体滤波器,是根据能陷理论,在一块AT切割的石英片上按一定的间隙排列两对以上的电极而构成,如图所示。



单片石英晶体滤波器示意图

当一定频率的电信号加到输入振子上时,由于逆压电效应在输入振子内产生厚度振动模式,这种振动模式,在无电极区呈指数形式的衰减(即能陷效应)。这种在无电极区逐渐衰减的振动模将引起相邻振子之间有限的耦合,而在相邻振子内形成厚度模的驻波。通过这种耦合依次将振动模传到石英片的输出振子上,然后通过正压电效应将机械振动转换成电信号输出。

通过正确地设计每个振子的几何尺寸、返回频率和振子之间的间距来控制机械振动波在石英片上的传播,从而达到滤波的目的。

这种滤波器适用于调幅、调频和单边带通信接收机、单边带发射机、多路通信系统。

石英晶体振荡器

quartz crystal oscillator

石英晶体振荡器是一种自激振荡器,它的振荡频率主要由石英谐振器决定。优点是

重量轻,体积小,频率稳定度好,一般比LC振荡器高两个数量级以上。缺点是振荡频率可调范围很小。

目前在提高频率稳定度方面,已采用恒温控制晶体振荡器和温度补偿晶体振荡器。在小型化方面,已采用集成电路,如薄膜电路石英晶体振荡器、厚膜电路石英晶体振荡器和半导体集成电路石英晶体振荡器等。此外,还设计制成了电压控制晶体振荡器,这种振荡器的特点是,在一定的频率范围内可调。

电压控制石英晶体振荡器

voltage controlled crystal oscillator

电压控制晶体振荡器,简称压控晶体振荡器。它的振荡频率可按照外加电压或信号的要求改变。

压控振荡器一般由AT切割石英谐振器、硅突变结变容二极管和振荡电路组成。采用AT切割基频时,振荡器的性能如下表所示。

压控晶体振荡器	可调范围(频偏)	宽温度范围内频率的相对变化	最高振荡频率
窄带	$\Delta f/f \leq 25 \times 10^{-4}$	$\Delta f/f \leq 100 \times 10^{-6}$	25兆赫
宽带	$\Delta f/f \leq 3 \times 10^{-3}$	$\Delta f/f \leq 200 \times 10^{-6}$	25兆赫
温度补偿	$\Delta f/f \leq 3 \times 10^{-4}$	$\Delta f/f \leq 1 \times 10^{-6}$	25兆赫

采用AT泛音谐振器时频偏下降 $\frac{1}{n} 2$ (n为泛音次数)

用表面声波器件作压控晶体振荡器,最大可调范围(频偏) $\Delta f/f \leq 1 \times 10^{-2}$,频率稳定度 $\Delta f/f \leq 1 \times 10^{-9}/\text{秒}$,振荡频率大于20兆赫。

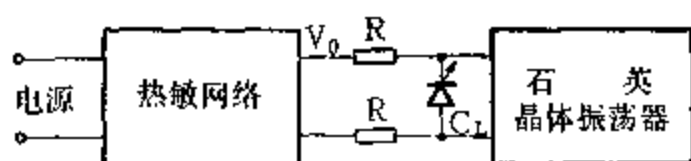
压控晶体振荡器大多用于锁相技术、频率负反馈系统及频率调制,如跟踪接收机、彩色电视接收机、电视发射机、微波中继设备、卫星通信设备和多卜勒雷达中。当将其用作调频器时,称为调频晶体振荡器。

温度补偿石英晶体振荡器

temperature compensated crystal

oscillator

温度补偿石英晶体振荡器, 简称温补振荡器。它不采用恒温槽而用补偿方法提高其频率稳定度, 优点是不预热, 体积小, 重量轻, 耗电量小, 开机即能工作。补偿后在宽温度范围内, 频率的相对变化可达 $5 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-8}$, 适用于各种小型电台和野外测试仪器作标准频率源。补偿原理如图所示。



温度补偿晶体振荡器的方框图

热敏网络输出电压 V_0 随温度而变化, 使石英晶体振荡器的负载电容 C_L 发生改变, 从而引起频率的变化。这个变化应和振荡器频率随温度的变化方向相反, 数值相等。用这样的补偿方法, 使振荡器在较宽的温度范围内, 有较高的频率稳定度。

热敏网络一般是用热敏电阻和金属膜电阻组成的分压网络, 因此, 要求电源电压十分稳定, 以保证补偿精度。此外, 还有数字式补偿法和多晶体补偿法等。

高稳定度石英晶体振荡器

high stability quartz crystal oscillator

高稳定度石英晶体振荡器系指稳定度高于 $10^{-8}/\text{天}$ 的石英晶体振荡器。

这种振荡器由三部分构成: 高精密石英谐振器、高稳定的振荡电路和恒温器。稳定度高于 $10^{-10}/\text{天}$ 时多采用双层恒温器。

为了充分发挥高精密石英谐振器的高 Q

值和高稳定性的特点, 设计振荡电路时, 应适当地减小激励电流, 尽量消除负载电容和温度等变化的影响, 从而保证振荡频率的稳定性。

这种石英晶体振荡器, 经过长期工作 (一年以上), 稳定度可达 $10^{-12}/\text{天} \sim 10^{-13}/\text{天}$ 。主要用于频率和时间标准。

负载电容

load capacitance

在石英晶体振荡器中, 与石英谐振器联合决定工作频率的有效外接电容, 称为负载电容。负载电容的标准值, 一般选为 20, 30, 50, 100 微微法。

等效串联电阻

equivalent series resistance

石英谐振器与规定的负载电容串联后, 该电路的总阻抗在标称频率附近的两个频率上呈电阻性, 其中较低的那个频率所对应的电阻, 称为等效串联电阻。

等效并联电阻

equivalent parallel resistance

石英谐振器与规定的负载电容并联后, 该电路的总阻抗在标称频率附近的两个频率上呈电阻性, 其中较高的那个频率所对应的电阻, 称为等效并联电阻。

激励电平

level of drive

石英谐振器在测试条件下所消耗的功率激励电平的标准值, 一般选为 2, 1, 0.5, 0.2, 0.1, 0.05, 0.02, 0.01, 0.001, 0.0001 毫瓦。

disintegration	9-48	free dielectric constant	9-10
dissipation factor	9-11	frequency adjustment	9-58
drum thickness-flexure vibrator	9-19	frequency constant	9-15
drying	9-51	frequency stability	9-7
dry pressing	9-49	frequency temperature characteristics	9-7
		frequency temperature coefficient	9-7
		frequency tolerance	9-8
		fundamental frequency	9-7
E			
edging	9-56		
elastic compliance constant	9-9	G	
elastic constant	9-9		
elastic stiffness constant	9-9	gadolinium molybdate	9-43
electrical axis	9-33	glazing	9-52
electrical quality factor	9-11	granulation	9-48
electrical twining	9-34	grinding	9-46
electromechanical coupling factor	9-13	grinding of optical crystals	9-55
electronic ceramics	9-21		
electro-optic crystals	9-36	H	
electrostrictive effect	9-8		
energy-trap type vibration mode	9-20	hexagonal system	9-3
equivalent circuit of piezoelectric vibrator	9-5	high frequency ceramic filter	9-60
equivalent parallel resistance	9-69	high stability quartz crystal oscillator	9-69
equivalent series resistance	9-69	high temperature glaze	9-53
etching orientation	9-56	hot isostatic pressing	9-51
evacuating	9-58	hot pressing	9-50
evaporation technique	9-54	hydro-thermal method	9-53
extrusion	9-49		
F			
face centred lattice	9-4	I	
ferro-elastic effect	9-9		
ferroelectric ceramics	9-27	injection moulding	9-49
ferroelectric crystals	9-35	intermediate frequency ceramic filter	9-59
ferroelectric Curie point	9-10	isometric system	9-3
ferroelectric domains	9-5	isostatic pressing	9-51
ferroelectric hysteresis loop	9-5		
ferroelectricity	9-5	K	
figure of merit of piezoelectric vibrator	9-10		
filter-press	9-47	Kaolin	9-22
finishing after firing	9-52	Kyropoulos, method	9-54
firing	9-52		
firing silver paste	9-57	L	
flame fusion method	9-53		
flame melt method	9-53	lanthanum titanate	9-41
fluid energy milling	9-46	lapping	9-56
flux growth method	9-54	lapping for cemented plate	9-56
flux pulling technique	9-54	lapping using star lapping machine	9-56
forming	9-48	lattice	9-1
forming method using doctor blading process	9-49	lead germanate	9-41
forsterite ceramics	9-22	lead germanate-vanadite	9-43
		lead germanium oxide	9-41
		lead molybdate	9-43
		lead titanate ceramics	9-29
		lead zirconat-titanate ceramics	9-30

left-handed quartz	9-33
length extension vibration mode	9-18
level of drive	9-69
lithium gallium oxide	9-40
lithium germanium oxide	9-41
lithium iodate	9-40
lithium niobate	9-39
lithium tantalate	9-39
load capacitance	9-69
longitudinal electromechanical coupling factor	9-14
longitudinal length extension vibration mode	9-18
low-alkali ceramics	9-23
low frequency ceramic filter	9-59
low temperature glaze	9-53
low-temperature sintered ceramics	9-27

M

magnesia ceramics	9-24
magnesia-lanthana-titania system ceramics	9-28
magnesium titanate system ceramics	9-27
maximum admittance frequency	9-6
maximum impedance frequency	9-6
mechanical axis	9-33
mechanical quality factor	9-9
mercury sulfide	9-44
metallizing	9-53
minimum admittance frequency	9-6
minimum impedance frequency	9-6
mixing of raw materials	9-46
molten-salt growth method	9-54
monoclinic system	9-2
monolithic quartz crystal filter	9-68
multi-vibration-mode filter	9-60

N

niobate system ceramics	9-31
nominal frequency	9-7

O

optical axis	9-33
optical orientation	9-56
optical twinning	9-33
orientation	9-55
orthorhombic system	9-3
overtone frequency	9-7

P

parallel resonance frequency	9-6
para-tellurite crystal	9-42
perovskite structure	9-4
phase diagram	9-4
piezoelectric accelerometer	9-65
piezoelectric angular rate sensor	9-64
piezoelectric ceramic delay line	9-66
piezoelectric ceramic discriminator	9-60
piezoelectric ceramic gas-sparking plug	9-61
piezoelectric ceramics	9-29
piezoelectric constant	9-11
piezoelectric constant d_{ij}	9-12
piezoelectric constant e_{ij}	9-12
piezoelectric constant g_{ij}	9-12
piezoelectric constant h_{ij}	9-12
piezoelectric crystals	9-32
piezoelectric effect	9-8
piezoelectric flowmeter	9-66
piezoelectric gyroscope	9-65
piezoelectric lighter	9-62
piezoelectric pressure meter	9-62
piezoelectric pyrometer	9-66
piezoelectric strain constant	9-12
piezoelectric stress constant	9-12
piezoelectric stiffness constant	9-13
piezoelectric thickness gauge	9-62
piezoelectric tuning fork	9-61
piezoelectric vibrator	9-5
piezoelectric voltage constant	9-12
planar electromechanical coupling factor	9-13
plating	9-57
point group	9-1
Poisson's ratio	9-10
polarizing	9-53
polishing	9-57
polishing of optical crystals	9-55
porous ceramics	9-26
potassium deuterium phosphate	9-37
potassium dihydrogen phosphate	9-37
potassium niobate	9-38
potassium tantalate-niobate	9-38
pre-pressing	9-48
primitive lattice	9-3
pugging	9-48
pyroelectric crystals	9-35
pyroelectric effect	9-8

Q		tellurium tungstate	9-44
quartz	9-22	temperature compensated crystal oscillator	9-68
quartz crystal	9-32	temperature stability	9-16
quartz crystal filter	9-67	ternary system ceramics	9-30
quartz crystal oscillator	9-68	testing	9-58
quartz element	9-34	tetragonal system	9-3
quartz resonator	9-67	thallium arsenic sulphide	9-43
quartz vibrator	9-34	thickness extension vibration mode	9-18
R		thickness-flexure vibration mode	9-18
radial extension vibration mode	9-17	thickness-shear vibration electromechanical coupling factor	9-15
radial extension vibration mode of ring electrode	9-17	thickness-shear vibration mode	9-19
resonance-antiresonance method	9-8	thickness vibration electromechanical coupling factor	9-14
resonance frequency	9-6	time stability	9-15
right-handed quartz	9-33	transmission circuit method	9-8
Rocheite salt	9-36	transparent ceramics	9-26
roll forming	9-50	transparent ferroelectric ceramics	9-29
rounding	9-57	transverse electromechanical coupling factor	9-13
rutile ceramics	9-26	transverse length extension vibration mode	9-18
S		triclinic system	9-2
sagger	9-52	tri-glycine sulfate	9-45
sapphire	9-26	trigonal system	9-3
sealing	9-58	trimming	9-52
sedimentation analysis	9-47	U	
Seignette salt	9-36	unwanted frequency	9-7
semiconductive ceramics	9-28	V	
series resonance frequency	9-6	vacuum pugging	9-48
shaping	9-48	Verneuil's method	9-53
sieve analysis	9-47	vibration milling	9-46
silicon nitride ceramics	9-25	vibration modes	9-17
simple lattice	9-3	voltage controlled crystal oscillator	9-68
sintering	9-52	W	
slip casting	9-49	width-flexure vibration mode	9-19
sodium potassium tartrate tetrahydrate	9-36	X	
soldering	9-57	X-ray orientation	9-56
solution technique	9-54	Z	
space group	9-2	zero temperature coefficient point	9-7
split-ring flexure vibrator	9-19	zinc oxide	9-45
spontaneous polarization	9-4	zirconate ceramics	9-25
spray drying	9-48	zirconium titanate system ceramics	9-27
stentite ceramics	9-22		
strontium barium niobate	9-40		
T			
talc	9-22		
tellurium oxide	9-42		

[G e n e r a l I n f o r m a t i o n]

书名= 电子工业技术词典 电子陶瓷与压电、铁电晶体

作者=

页数= 7 3

S S 号= 0

出版日期=

V s s 号= 6 0 2 9 5 2 7 3

一、物理基础

晶系

点阵

点群

晶类

空间群

三斜晶系

单斜晶系

斜方晶系

三方晶系

四方晶系

六方晶系

立方晶系

等轴晶系

原始格子

底心格子

体心格子

面心格子

钙钛矿型结构

相图

自发极化

铁电性

铁电畴

电滞回线

压电振子

压电振子等效电路

最小阻抗频率

最大导纳频率

最大阻抗频率

最小导纳频率

串联谐振频率

并联谐振频率

谐振频率

反谐振频率

基音频率

泛音频率

标称频率

寄生频率

频率稳定度

频率老化

频率温度系数

零温度系数点

频率温度特性

频率误差

传输线路法

谐振 - 反谐振法

压电效应

正压电效应

逆压电效应

电致伸缩效应

热释电效应

铁弹性效应

弹性常数

弹性柔顺常数

弹性刚度常数
机械品质因数
压电振子的“优值”
泊松比
横纵方向变形尺寸比
铁电居里点
介质隔离率
自由介电常数
受夹介电常数
电学品质因数
介质损耗
损耗因子
压电常数
压电常数 d_{if}
压电应变常数
压电常数 g_{if}
压电电压常数
压电常数 e_{if}
压电应力常数
压电常数 h_{if}
压电劲度常数
机电耦合系数
平面机电耦合系数
横向机电耦合系数
纵向机电耦合系数
厚度振动机电耦合系数
厚度切变振动机电耦合系数
频率常数
时间稳定性
温度稳定性
绝缘强度
抗弯强度
导热系数
线膨胀系数
振动模式
径向伸缩振动模
环电极径向伸缩振动模
长度伸缩振动模
纵向长度伸缩振动模
横向长度伸缩振动模
厚度伸缩振动模
厚度弯曲振动模
宽度弯曲振动模
鼓形厚度弯曲振子
开槽环形弯曲振子
厚度切变振动模
能阱振动模
二、电子陶瓷
电子陶瓷
装置瓷
电真空瓷
陶瓷原料
高岭土
膨润土
滑石
石英
滑石瓷
镁橄榄石瓷
钡长石瓷
刚玉 - 莫来石瓷

低碱瓷
氧化铝瓷
氧化铍瓷
氧化镁瓷
氮化硼瓷
氮化硅瓷
四钛酸钡瓷
锆酸盐瓷
多孔陶瓷
透明陶瓷
蓝宝石
电容器陶瓷
金红石瓷
钛酸钙瓷
钛镁系瓷
钛锆系瓷
铁电陶瓷
低温烧结陶瓷
镁 - 镧 - 钛系统陶瓷
钛酸钡 - 二钛镧 - 钛酸锶系统陶瓷
半导体陶瓷
压电陶瓷
反铁电陶瓷
透明铁电陶瓷
钛酸钡陶瓷
钛酸铅陶瓷
二元系陶瓷
锆钛酸铅陶瓷
三元系陶瓷
铌酸盐系陶瓷
三、压电、铁电晶体
晶体
压电晶体
石英晶体
 石英
 石英
左旋石英
右旋石英
石英的坐标轴
光轴
电轴
机械轴
光双晶
电双晶
石英元件
石英振子
切型
切型符号
热释电晶体
铁电晶体
反铁电晶体
电光晶体
声光晶体
酒石酸钾钠
罗息盐
息格涅特盐
磷酸二氢铵
磷酸二氢钾
磷酸二氘钾
砷酸二氘铯

铈酸钾
钛酸钡
钽铈酸钾
铈酸锂
钽酸锂
铈酸钡钠
铈酸锶钡
碘酸锂
镓酸锂
锆酸锂
钛酸镧
锆酸铋
锆酸铅
硅酸铋
二氧化碲
对位黄碲矿晶体
氟化钡锰
硫碘化铋
钼酸钆
锆钒酸铅
硫砷铈
钼酸铅
钨酸碲
氮化铝
硫化汞
朱砂
硫化镉
氧化锌
钛酸铋
硫酸三甘肽
三甘氨酸硫酸盐
四、工艺
原材料的混合
预烧
粉碎
气流粉碎
振动磨
球磨
助磨剂
颗粒度测定
筛分析法
沉降分析法
除铁
压滤
喷雾干燥
真空练泥
陈腐
捏练
打粉
预压
造粒
成型
干压
注浆
挤压
热压铸
流延法薄膜成型
轧膜
热压
等静压

高温等静压
干燥
修整
匣钵
排蜡
焙烧
烧成
烧后加工
上釉
高温釉
低温釉
金属化
极化
焰熔法
水热法
助熔剂提拉法
熔盐法
助熔剂法
水溶液降温析晶法
水溶液蒸发结晶法
晶体光轴的测定
光学晶体的切割
光学晶体的研磨
光学晶体的抛光
定向
X射线定向
腐蚀定向
光学定向
切割
外刃切割
内刃切割
研磨
行星研磨
粘板研磨
磨边
磨圆
磨球面
抛光
被电极
烧银点
金属层牢化
焊电极引线
调频
校频
组装
封口
排气
测试
五、应用
陶瓷滤波器
低频陶瓷滤波器
中频陶瓷滤波器
高频陶瓷滤波器
多重模式滤波器
压电陶瓷鉴频器
压电音叉
压电陶瓷气体火花塞
压电打火机
压电压力计
压电厚度计

陶瓷变压器
陶瓷直流电源变换器
压电角速度传感器
压电陀螺
压电加速度计
压电高温计
压电流量计
压电陶瓷延迟线
石英谐振器
石英晶体滤波器
单片石英晶体滤波器
石英晶体振荡器
电压控制石英晶体振荡器
温度补偿石英晶体振荡器
高稳定度石英晶体振荡器
负载电容
等效串联电阻
等效并联电阻
激励电平